

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



**TESIS**

**“ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA  
ESTRUCTURA GEOLÓGICA EN LOS ALREDEDORES DEL BAÑO SAN  
IGNACIO, LINARES, NUEVO LEÓN”**

**PRESENTA**

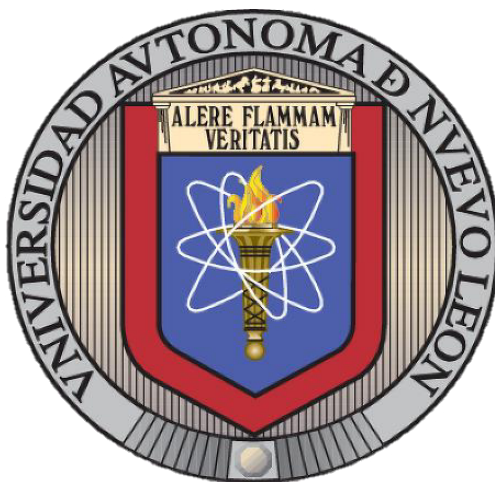
**XAVIER JEDNNIN PÉREZ AGUIRRE**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

**SEPTIEMBRE, 2017**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



**TESIS**

**“ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA  
ESTRUCTURA GEOLÓGICA EN LOS ALREDEDORES DEL  
BAÑO SAN IGNACIO, LINARES, NUEVO LEÓN”**

**PRESENTA**

**XAVIER JEDNNIN PÉREZ AGUIRRE**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

**LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**SEPTIEMBRE, 2017**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



La Tesis

**“ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA DETERMINACIÓN DE  
ESTRUCTURA GEOLÓGICA EN LOS ALREDEDORES DEL BAÑO SAN  
IGNACIO, LINARES, NUEVO LEÓN”**

Que presenta

**XAVIER JEDNNIN PÉREZ AGUIRRE**

Ha sido aceptada como requisito parcial para obtener el grado de  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

Vo. Bo.  
Director de Tesis

---

**DR. OSCAR MARIO ROMERO DE LA CRUZ**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



La Tesis

**“ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA DETERMINACIÓN DE  
ESTRUCTURA GEOLÓGICA EN LOS ALREDORES DEL BAÑO SAN  
IGNACIO, LINARES, NUEVO LEÓN”**

Que presenta

**XAVIER JEDNNIN PÉREZ AGUIRRE**

Ha sido aceptada como requisito parcial para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

Vo. Bo.

Comité de Titulación

---

**DR. OSCAR MARIO ROMERO DE LA CRUZ**

Director de Titulación

---

**DR. GABRIEL CHÁVEZ CABELLO**

Co-Director de Titulación

---

**DR. SÓSTENES MÉNDEZ DELGADO**

Co-Director de Titulación

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

SEPTIEMBRE DE 2017



*Por este conducto declaro bajo protesta que este trabajo ha sido desarrollado personalmente con el apoyo del Comité de Titulación. Toda la información utilizada para este estudio ha sido citada debidamente.*

---

Xavier Jednnin Pérez Aguirre

Septiembre de 2017

## AGRADECIMIENTOS

---

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por las becas otorgadas durante los estudios de posgrado.

En especial agradecer enormemente a mi asesor, tutor, maestro y amigo, Dr. Óscar Mario Romero de la Cruz, por su apoyo académico y personal durante la maestría y por brindarme la oportunidad de realizar mi posgrado.

A mis asesores, Dr. Gabriel Chávez Cabello y al Dr. Sóstenes Méndez Delgado, por su interés en el trabajo, el tiempo invertido, paciencia, comentarios y orientación en la elaboración de la tesis.

Un especial agradecimiento al Dr. Fernando Velasco Tapia por sus consejos y motivación no solo académicos, sino también personales.

Al personal administrativo de la FCT, especialmente a la subdirección de posgrado a cargo del Dr. Carlos Gilberto y a Karla Casas...

A mis compañeros de Posgrado: Magdaleny, Myriam, Meme, Chava, Chucho, Ángelo, Simón, Christian, Merlo, Carlos, Jovany, el Sr. Raúl, Dessiré, Anita, Márgil, Danny, Sahid, Many, Adrián, Cesar, sin ustedes el posgrado no habría sido el mismo. Y a todos mis demás amigos que faltan por mencionar.

Por último y con especial aprecio a mí querida esposa Ana Vigil, quien me ha brindado apoyo en cada momento, compartiendo no solo la felicidad de crecer juntos sino también las penurias que nos lleva al éxito. Gracias por todo mi amor!!

Por último a todas las personas que llegué a omitir involuntariamente, pero que me han mostrado amistad a lo largo de este trabajo.

## CONTENIDO

---

AGRADECIMIENTOS.....	i
CONTENIDO .....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	v
RESUMEN.....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.    HIPÓTESIS.....	9
1.2.    OBJETIVOS GENERALES .....	9
1.3.    OBJETIVOS PARTICULARES.....	10
1.4.    METODOLOGÍA .....	11
2. GEOLOGÍA.....	13
2.1.    GEOLOGÍA REGIONAL.....	13
2.2.    GEOLOGÍA LOCAL .....	17
3. GEOFÍSICA .....	25
3.1.    METODOLOGÍA .....	26
3.2.    ADQUISICIÓN DE DATOS .....	31
3.2.1. DATOS DE CAMPO MAGNÉTICO TOTAL.....	31
3.2.2. DATOS GRAVIMÉTRICOS .....	33

3.3.	CAMPOS RESIDUALES .....	34
3.3.1.	ANOMALÍA MAGNÉTICA RESIDUAL.....	35
3.3.2.	ANOMALÍA GRAVIMÉTRICA RESIDUAL.....	37
3.4.	MODELADO DIRECTO.....	40
3.4.1.	MODELADO MAGNÉTICO .....	42
3.4.2.	MODELADO DE GRAVEDAD .....	46
3.5.	ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS.....	49
4.	RESULTADOS.....	56
5.	DISCUSIÓN .....	62
6.	CONCLUSIONES .....	68
7.	REFERENCIAS .....	69
8.	ANEXOS.....	75
	ANEXO I. Rutina para calcular el Campo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF) adaptado de IAGA (2012).....	75
	ANEXO II. Rutina desarrollada para ajustar cualquier superficie a un plano lineal.....	97
	ANEXO III. Rutina empleada para calcular la anomalía magnética de un polígono de N-lados, modificada de Won & Bevis (1987).....	98
	ANEXO IV. Rutina empleada para calcular la anomalía gravitatoria producida por un polígono irregular de N-lados, modificada de Blakely (1996). .....	101

## LISTA DE FIGURAS

---

<i>Figura 1.1. Mapa de localización del Baño San Ignacio. ....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 1.2. Modelos esquemáticos del subsuelo en el Baño San Ignacio de acuerdo a: A) Anderson (1984), B) Hubberten (1986), C) Barbarín-Castillo et al. (1988). Imagen modificada de Hurtado-Vázquez (1992). ....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1.3. a) Ubicación de los sondeos eléctricos realizados por Rodríguez-García (1992) y, b) sección interpretada a partir de la resistividad del suelo. Modificado de Rodríguez-García (1992). ....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 1.4. Modelo esquemático de las manifestaciones y efectos ocurridos en un sistema de flujo de agua subterránea controlado por la gravedad dentro de una cuenca sin confinamiento. Modificado de Toth (1999).....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1.5. Sección modelada a partir de datos de gravedad y magnetismo en el noreste de México, cerca del área de estudio. SMOc = Sierra Madre Oriental, AT = Arco de Tamaulipas. (Aiken et al., 1997).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1.6. Secuencia metodológica seguida durante el desarrollo del presente trabajo. 12</i>	
<i>Figura 2.1. Modelo digital de elevación (INEGI, 2017) con la geología regional de la carta G14-11 del Servicio Geológico Mexicano. SMO = Sierra Madre Oriental. LIN = Linares. BSI = Baño San Ignacio. SC = Sierra de San Carlos. ....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.2. Secciones que muestran la evolución de la Isla de San Carlos desde el Paleozoico tardío hasta el Jurásico tardío. Modificada de Goldhammer (1999) .....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.3. Mapa geológico local. Modificado de Rodríguez-Palacios (1993). ....</i>	<i>19</i>

<i>Figura 2.4. Mapa del área de estudio donde se muestra la ubicación de los pozos</i>	
<i>Trincheras-1 y Linares-1. ....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.5. Unidades litológicas obtenidas en los núcleos extraídos del pozo Trincheras-1, así como su edad y espesor. Modificado de Riba (2010) .....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.6. Unidades litológicas y edades obtenidas de los núcleos de perforación del pozo Linares-1. Modificado de Riba (2010). ....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.1. A) Anomalía gravimétrica producida por la masa de C) que se encuentra bajo las líneas del campo gravitatorio teórico para el área de estudio y, B) Intensidad del campo magnético producida por el cuerpo C) bajo el campo geomagnético teórico (línea morada). C) Cuerpo rectangular vertical con susceptibilidad de <math>k = 1 \text{ S.I}</math> y densidad de <math>\rho = 2.2\text{gr/m}^3</math>. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.2. Las líneas del campo gravitatorio producido por la tierra están dirigidas hacia su centro. Un cuerpo en el subsuelo también produce líneas de campo gravitatorio dirigidas hacia su centro de masa, a su vez, está bajo influencia del campo gravitatorio terrestre. Modificado de Dentith y Mudge (2014). ....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.3. Las líneas del campo geomagnético son verticales en los polos y horizontales en el ecuador magnético, por lo tanto, la intensidad del campo que afecta a un cuerpo susceptible es la resultante de la declinación y la inclinación de dicho campo. El campo magnético producido por un cuerpo magnetizado por el campo geomagnético depende de su ubicación geográfica. Modificado de Dentith y Mudge (2014). ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.4. Mapa del área de estudio, se muestran los puntos donde fueron adquiridos los datos de campo magnético total.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.5. Magnetómetro Overhauser GSM-19 marca GemSystems utilizado durante la adquisición de datos de campo magnético total. ....</i>	<i>33</i>

<i>Figura 3.6. Anomalía de Bouguer generada con datos de INEGI. BSI=Baño San Ignacio.</i>	34
<i>Figura 3.7. Mapa de anomalía magnética residual de la zona de estudio. BSI = Baño San Ignacio.</i>	37
<i>Figura 3.8. Plano lineal ajustado para remover el efecto regional de la anomalía de Bouguer. BSI=Baño San Ignacio.</i>	39
<i>Figura 3.9. Anomalía de Bouguer residual. BSI=Baño San Ignacio.</i>	40
<i>Figura 3.10. Diagrama de flujo para realizar un modelo directo. Modificado de BLAKELY (1996).</i>	41
<i>Figura 3.11. a) Esquema de una figura tridimensional de la que se extrae una sección transversal para aproximar su geometría con, b) un polígono bidimensional de N-lados simplificado. Modificada de BLAKELY (1996).</i>	42
<i>Figura 3.12. Diagrama de flujo que muestra el proceso implementado en la interfaz de procesado para obtener el modelo de un cuerpo bidimensional de N-lados, a través de un proceso inverso.</i>	55
<i>Figura 4.1. Mapa de la anomalía magnética residual del área de estudio, determinado en el presente trabajo.</i>	57
<i>Figura 4.2. Mapa de anomalía de Bouguer residual para el área del Baño San Ignacio.</i>	59
<i>Figura 4.3. Modelo calculado del Perfil A-A'.</i>	60
<i>Figura 4.4. Modelo calculado para el perfil H-H'.</i>	61
<i>Figura 4.5. Modelo estimado para el perfil J-J'.</i>	62
<i>Figura 5.1. Esquema del modelo propuesto para la génesis del Baño San Ignacio. Se propone que el agua subterránea fluye desde la zona de recarga en la montaña donde al perder energía disminuye su temperatura, viaja a través del frente tectónico cuya deformación disminuye gradualmente, alcanza un alto de basamento que actúa como trampa hidráulica dirigiendo la corriente de agua regional hacia la superficie</i>	



*donde recupera la energía perdida en forma de calor. AJ=Anticlinal Jaures.*

*CF=Cabalgadura frontal de la Sierra Madre Oriental. BSI= Baño San Ignacio. .... 67*

## RESUMEN

---

A 30 kilómetros de la ciudad de Linares, Nuevo León, se encuentra el manantial Baño San Ignacio cuya temperatura de 36°C es superior a la de otras fuentes de agua en la zona. En trabajos anteriores, se relaciona esta anomalía térmica con dos diferentes estructuras geológicas ubicadas debajo del manantial: 1) un intrusivo alcalino vinculado al complejo volcánico de la Sierra de San Carlos en la Provincia Alcalina Oriental Mexicana y, 2) un diapiro de sal.

En el presente trabajo se desarrolló una interfaz gráfica, en lenguaje Matlab, que ejecuta las reducciones, el modelado directo y la inversión de datos magnéticos y gravimétricos. Se utilizó esta interfaz para analizar datos alrededor del Baño San Ignacio con el objetivo de identificar las estructuras geológicas ahí presentes.

Los modelos resultantes no confirman la existencia de alguno de los cuerpos sugeridos previamente. La estructura identificada corresponde a una elevación del basamento orientada NW-SE, cuya dimensión sobrepasa al área de estudio y su borde occidental cruza por debajo del Baño San Ignacio.

Se propone que el manantial es controlado por un flujo de agua subterránea regional que inicia en el frente tectónico de la Sierra Madre Oriental y se desplaza

hacia el Este; la elevación del basamento opera como una trampa hidráulica que rige el ascenso del flujo regional

## ABSTRACT.

---

To 30 Km from Linares City, Nuevo León, is located Baño San Ignacio spring with its average temperature (36°C) is higher than other water resources in the area. In previous works the origin of this thermal anomaly was related to two different geologic structures placed under the spring: 1) an alkaline intrusive body linked to a Sierra of San Carlos volcanic complex who belong to Eastern Alkaline Province and, 2) a salt diapir.

In this work was developed a graphical user interface in Matlab that performs reductions, forward model and inversion of magnetic and gravity data. A data set around Baño San Ignacio spring was analyzed with the goal of identifying semi-regional geologic structures below, using the graphical interface.

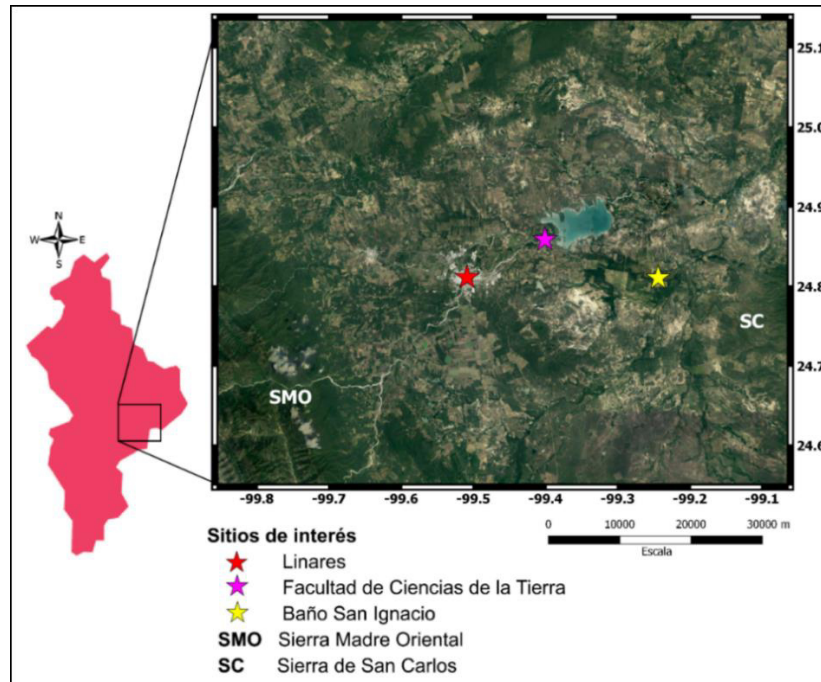
The resulting models do not confirm the existence of any previously suggested bodies. In contrast, the identified structure is interpreted as a uplift basement that has a trend NW-SE and its dimensions are higher than the studying area, the western edge of elevation is located under Baño San Ignacio spring.

It is proposed that spring is controlled by regional groundwater flow. This system begins in Sierra Madre Oriental's tectonic front and flows through the Eastern, the uplift basement plays as hidraulic trap forcing the groundwater flow to ascend and discharge.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Dentro del estado de Nuevo León, a menos de 30 km hacia el Este de la ciudad de Linares, se ubica un manantial termal conocido como Baño San Ignacio como lo muestra la *FIGURA 1.1*. La característica principal de este manantial es que su temperatura promedio es de 37°C y la concentración de minerales resulta superior a la presente en los demás manantiales de la región. Geológicamente se ubica en una semi-cuenca limitada por dos elementos regionales: al Oeste, el frente tectónico de la Sierra Madre Oriental y, al Este, un complejo intrusivo vinculado a la Provincia Alcalina Oriental Mexicana que se conoce como Sierra de San Carlos.



*Figura 1.1. Mapa de localización del Baño San Ignacio.*

Para explicar la genética de la anomalía térmica en el manantial surgieron tres diferentes modelos (*FIGURA 1.2*):

1) En el primero, ANDERSON (1984) identifica que fluye un agua rica en minerales por lo cual, sugiere que debajo del manantial el agua está en contacto con un cuerpo conductor térmico, domo salino, y asciende a través fallas rellenas por sal (*FIGURA 1.2.A*).

2) En contraste, HUBBERTEN (1986) sugirió que es producto del contacto del agua subterránea con un cuerpo ígneo remanente de la intrusión en la Sierra de San Carlos (*FIGURA 1.2.B*).

3) En el tercero, BARBARÍN-CASTILLO ET AL. (1988) propone que el manantial se encuentra en una cuenca de subsidencia y debajo existe una estructura ígnea y otra salina que generan la anomalía térmica (*FIGURA 1.2.C*).

En cuanto a estudios geofísicos, solo se han realizado dos. En el primero, HURTADO-VÁZQUEZ (1992) realizó mediciones electromagnéticas de conductividad a través de perfiles de 60 metros de profundidad, con ello identificó un lineamiento conductivo profundo orientado NW-SE y otro más somero con rumbo NE-SW. Sugiere que el flujo de agua mineralizada y caliente produce el primer lineamiento en cambio, el flujo de agua con menor temperatura y minerales genera el segundo lineamiento. Sin embargo, no identificó las estructuras geológicas que mencionan ANDERSON (1984), HUBBERTEN (1986) y BARBARÍN-CASTILLO (1988).

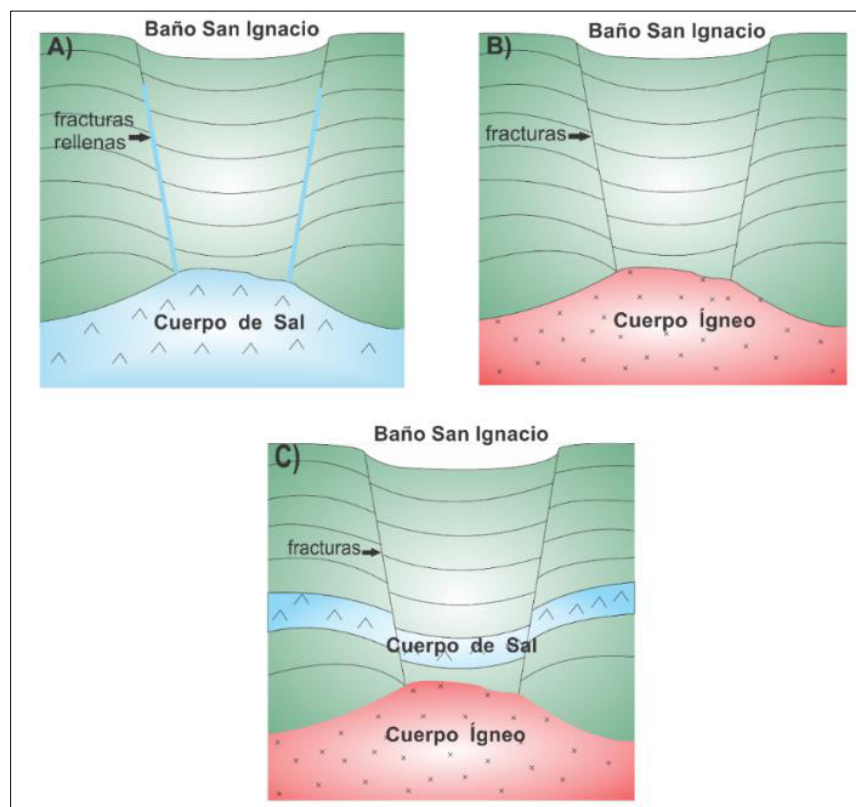


Figura 1.2. Modelos esquemáticos del subsuelo en el Baño San Ignacio de acuerdo a: A) Anderson (1984), B) Hubberten (1986), C) Barbarín-Castillo et al. (1988). Imagen modificada de Hurtado-Vázquez (1992).

RODRÍGUEZ GARCÍA (1992) realizó una serie de Sondeos Eléctricos Verticales (FIGURA 1.3 A) con lo que interpretó una sección 2D orientada Este-Oeste (FIGURA 1.3.B). Dentro de la Formación San Felipe identifico una depresión de 13 metros sobre la que se encuentra la Formación Méndez, las cuales están sepultadas por 2 metros de material lomo-arcilloso. Así mismo, RODRÍGUEZ GARCÍA (1992) realizó mediciones eléctricas de cuerpo cargado que le permitió identificar la dirección del flujo de agua. En el manantial Baño San Ignacio el flujo es vertical ascendente, a diferencia del flujo de agua más fría que es horizontal con dirección preferente NE y más somero.



En ambos trabajos geofísicos, la profundidad de exploración es menor a 60 metros, y no se ha reconocido la presencia de alguna estructura salina o un cuerpo ígneo. Así mismo, la extensión de ambos estudios se ha limitado al interior de la cuenca del manantial Baño San Ignacio.

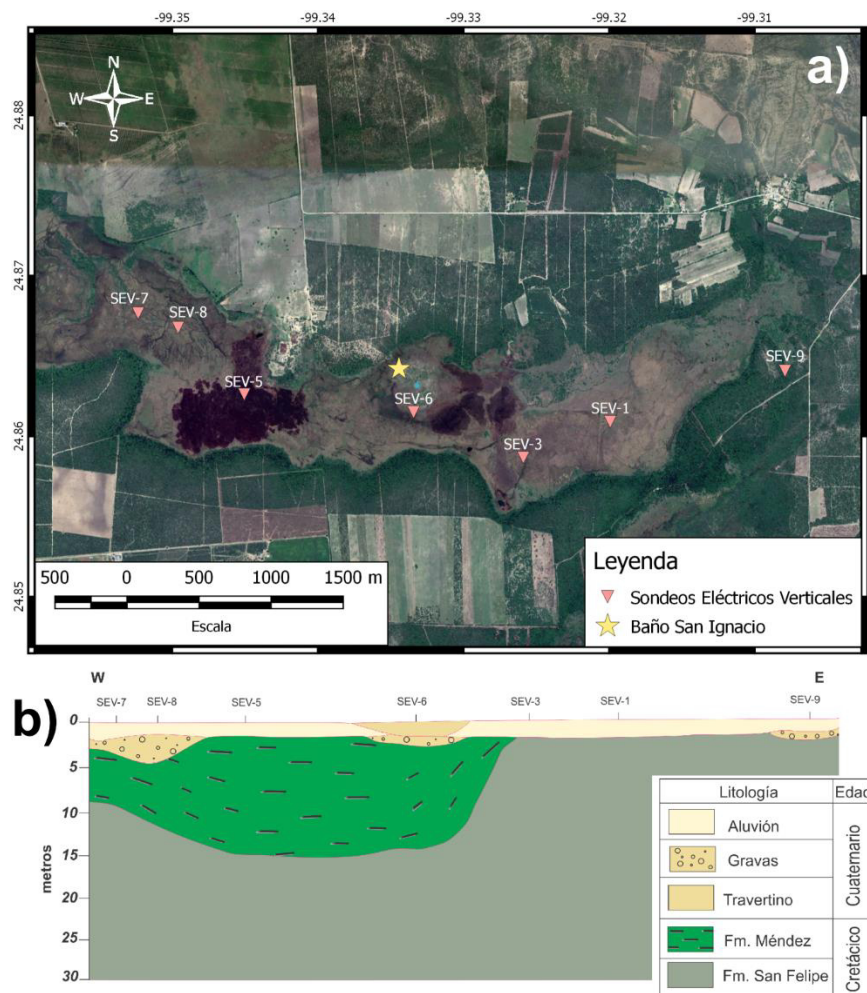


Figura 1.3. a) Ubicación de los sondeos eléctricos realizados por Rodríguez-García (1992) y, b) sección interpretada a partir de la resistividad del suelo. Modificado de Rodríguez-García (1992).

Con referencia a la información hidrogeoquímica, GARZA-CASTILLO (2006) realizó un análisis del manantial Baño San Ignacio y otros nueve a su alrededor. Identificó, en la salida del Baño San Ignacio, un dominio hidroquímico tipo Na-Ca-Cl-SO<sub>4</sub> que cambia hacia los bordes de la cuenca; por lo cual sostiene, que el Baño San Ignacio es alimentado por un flujo regional mineralizado a su paso por las litologías sedimentarias, en contraste, con un flujo local del que emerge el agua en los bordes de la cuenca. De esta manera, GARZA-CASTILLO (2006) propone que el sistema del Baño San Ignacio puede explicarse mediante los procesos de interacción agua-roca formulados por TOTH (1999), donde el flujo de agua subterránea controlado por la gravedad genera manantiales termales enriquecidos con SO<sub>4</sub> y Cl al encontrar una trampa hidráulica (FIGURA 1.4).

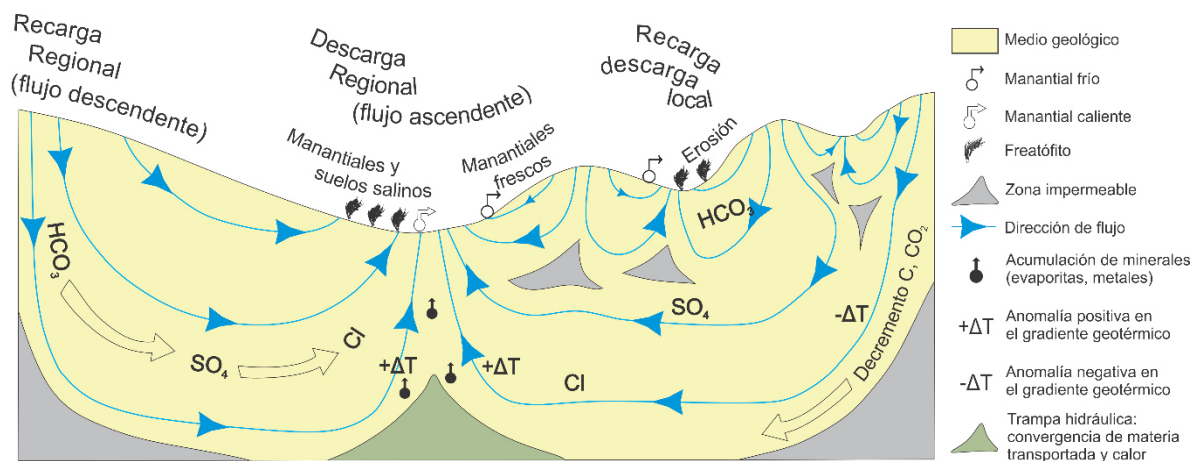


Figura 1.4. Modelo esquemático de las manifestaciones y efectos ocurridos en un sistema de flujo de agua subterránea controlado por la gravedad dentro de una cuenca sin confinamiento. Tomado de Toth (1999).

Existen publicaciones sobre casos en donde se han empleado los métodos gravimétrico y magnético para modelar estructuras geológicas en diversos

ambientes geológicos (GALLARDO-DELGADO ET AL., 2003; HUNTER-HUSTON ET AL., 1998; MEYER ET AL., 1998; PRIETO, 1998). AIKEN ET AL. (1997) modelaron un conjunto de secciones del Noreste de México considerando un contraste de susceptibilidad y densidad entre la secuencia sedimentaria post-jurásica, sedimentos pre-cretácicos, el basamento, el manto superior y una serie de intrusivos; en la sección de la *FIGURA 1.5* modela las estructuras del Arco de Tamaulipas a escala regional.

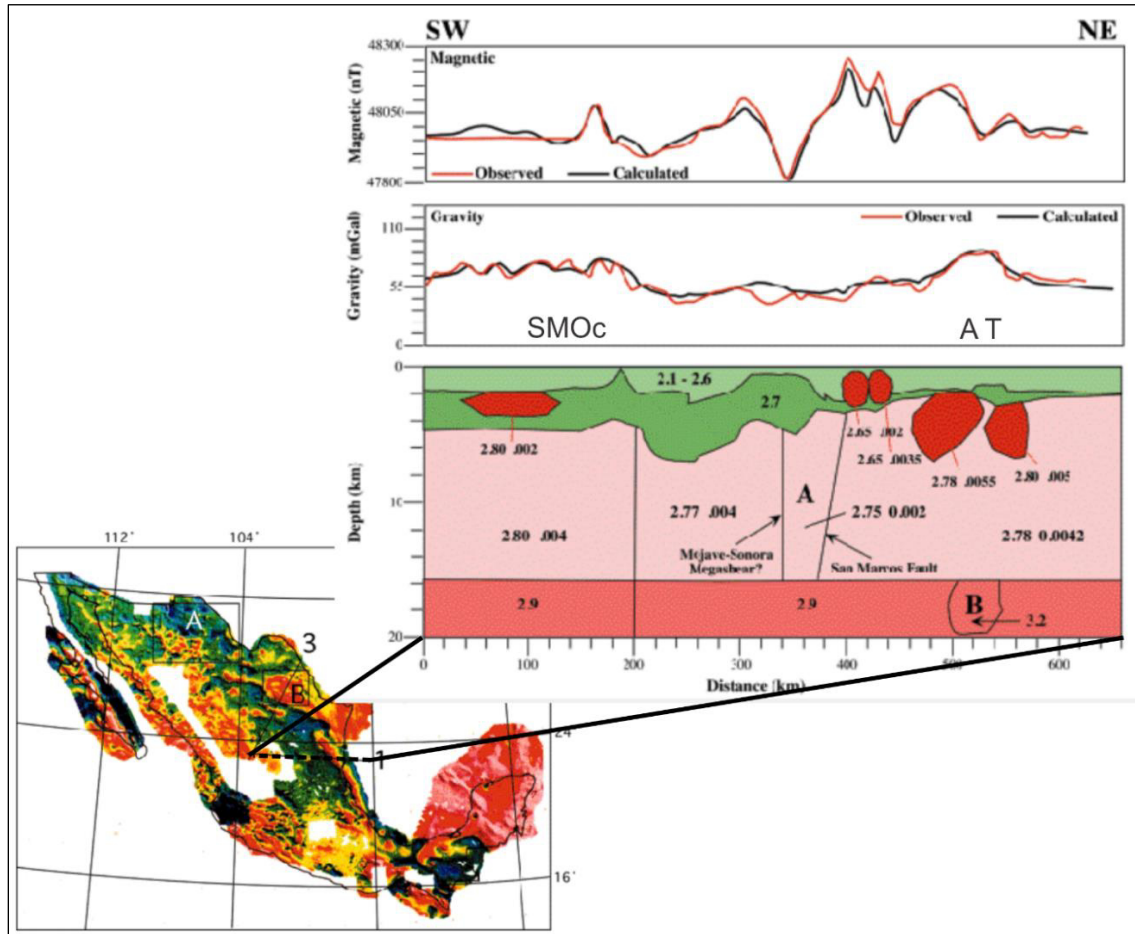


Figura 1.5. Sección modelada a partir de datos de gravedad y magnetismo en el noreste de México, cerca del área de estudio. SMOc = Sierra Madre Oriental, AT = Arco de Tamaulipas. (Aiken et al., 1997)

En el presente trabajo se desarrolla un estudio geofísico en un área de 163.714 km<sup>2</sup> alrededor del Baño San Ignacio, recurriendo a los métodos magnético y gravimétrico, con el objetivo de identificar las estructuras geológicas de escala semi-regional. La diferencia de densidad y de susceptibilidad magnética entre las unidades geológicas permite distinguir la distribución del basamento, identificar la presencia de estructuras salinas o intrusiones magmáticas (HINZE ET AL., 2013).

## 1.1.HIPÓTESIS

Debido a la susceptibilidad magnética y densidad que tienen las unidades litológicas, su distribución está relacionada con la anomalía en los campos gravitatorio y magnético. Mediante el modelado directo e inversión de dichas anomalías es posible identificar las estructuras geológicas.

Por lo tanto, realizando el modelado magnético y gravimétrico en los alrededores del Baño San Ignacio se reconocerán las estructuras geológicas presentes en el subsuelo, con ello será factible determinar si alguno de los modelos, propuestos por ANDERSON (1984), HUBBERTEN (1986) y BARBARÍN-CASTILLO (1988), para la génesis del manantial es acorde a las estructuras identificadas.

## 1.2.OBJETIVOS GENERALES

Los objetivos del presente trabajo son:

- i) identificar la geometría y distribución espacial de las estructuras semi-regionales presentes en el área del Baño San Ignacio y,

- ii) determinar la congruencia de los modelos genéticos del manantial (*FIGURA 1.2*), propuestos por ANDERSON (1984), HUBBERTEN (1986) y BARBARÍN ET AL. (1988), con los datos geofísicos observados.

### 1.3. OBJETIVOS PARTICULARES

Para lograr los objetivos generales se requiere:

- Escribir las rutinas en el entorno software Matlab que realicen reducciones, correcciones y filtrado de datos magnéticos y gravimétricos.
- Desarrollar una interfaz gráfica en el entorno software Matlab que incluya las rutinas anteriores, con la cual se facilitará la manipulación de los datos durante el procesado.
- Elaborar e incluir en la interfaz de procesado las rutinas que calculen los modelos directos de las anomalías magnéticas y gravitatorias.
- Realizar el análisis matemático para la estimación de parámetros a partir de las funciones del modelo para ambos campos.

- Generar los algoritmos para la inversión de los modelos e incorporarlos a la interfaz de procesado.
- Realizar los modelos, directo e inverso, para secciones a lo largo del área de estudio.

#### 1.4.METODOLOGÍA

La metodología seguida en el presente trabajo se esquematiza en la *FIGURA 1.5*. Esta inicia con la investigación bibliográfica de estudios geológicos y geofísicos realizados en el Baño San Ignacio, así mismo se consultaron trabajos geofísicos regionales que incluyeran al área de estudio y, en el mismo contexto regional, se investigó la evolución geológica de la zona. En este proceso se consultaron los fundamentos teóricos de los métodos magnético y gravimétrico, así como del modelado directo e inversión.

A la par de esta fase se desarrolló una interfaz gráfica en lenguaje Matlab para el análisis de los datos. Posteriormente, se realizó la adquisición de datos magnéticos en el área de estudio; al concluir se procesaron los datos y se determinaron los modelos.



*Figura 1.6. Secuencia metodológica seguida durante el desarrollo del presente trabajo.*

En el capítulo 2 se presenta la información geológica del área de estudio comenzando en un contexto regional y, posteriormente, se describe de manera local. En el capítulo 3 se define la teoría de los métodos magnético y gravimétrico; también se describe la adquisición de datos y el proceso realizado para obtener las anomalías residuales; posteriormente se exponen los principios para el modelado directo e inverso. En el capítulo 4 se describen los resultados obtenidos y son discutidos en el capítulo 5. Finalmente, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones del trabajo.



## 2. GEOLOGÍA

---

### 2.1. GEOLOGÍA REGIONAL

El Baño San Ignacio se localiza en la provincia de la Planicie Costera del Golfo, particularmente en una sub-provincia conocida como Pie de Monte, caracterizada por tener elevaciones entre 300 y 500 msnm. Existe una topografía suave con algunos pliegues orientados paralelamente al frente plegado de la Sierra Madre Oriental cuyos flancos buzan hasta 30°. En la cresta de estas suaves deformaciones, sobre planos de roca erosionada, se encuentran terrazas Plioceno-Cuaternarias las cuales fueron, durante algún tiempo, canales y valles donde se depositaron sedimentos aluviales. De acuerdo con RODRÍGUEZ-PALACIOS (1993) esto es evidencia de una inversión del relieve donde, por procesos sedimentarios que involucran erosión-depósito-cementación, los antiguos valles ahora son las mayores elevaciones de la zona.

De manera regional, en el área convergen dos provincias geológicas que surgen de diferentes procesos tectónicos. Al Oeste se localiza el frente de la cadena plegada compuesta por la secuencia de sedimentos marinos del Jurásico Tardío-Cretácico, conocida como Sierra Madre Oriental. Hacia el Este, existe evidencia de una actividad ígnea manifestada por un par de intrusiones magmáticas de composición predominantemente alcalina, la cuales se emplazaron

durante el Oligoceno; estos complejos ígneos, pertenecientes a la Provincia Alcalina Oriental de México, conforman las sierras de Tamaulipas y San Carlos. La *FIGURA 2.1* muestra ambas estructuras geológicas regionales que envuelven el área de estudio.

CHÁVEZ-CABELLO ET AL. (2011) menciona que la Sierra Madre Oriental es un orógeno resultado de una deformación, inicialmente de tipo cobertura, que plegó una secuencia de sedimentos marinos depositados en diversos ambientes desde el Jurásico Tardío hasta el Paleógeno. Posteriormente, desde el final del Paleógeno hasta el Mioceno, la deformación se propagó desde el basamento.

Hacia el Este del Baño San Ignacio se encuentra la Sierra de San Carlos-Crucillas y la Sierra de Tamaulipas que pertenecen a la Provincia Alcalina Oriental Mexicana, la cual es definida como una franja volcánica alcalina que inicia su desarrollo desde el Eoceno en la parte norte de la Provincia, cerca de Estados Unidos, y se hace más joven hacia el sur hasta llegar al estado de Veracruz (FERRARI ET AL, 2005; HENRY ET AL., 1991). Estos intrusivos se emplazaron en zonas previamente debilitadas o deformadas.

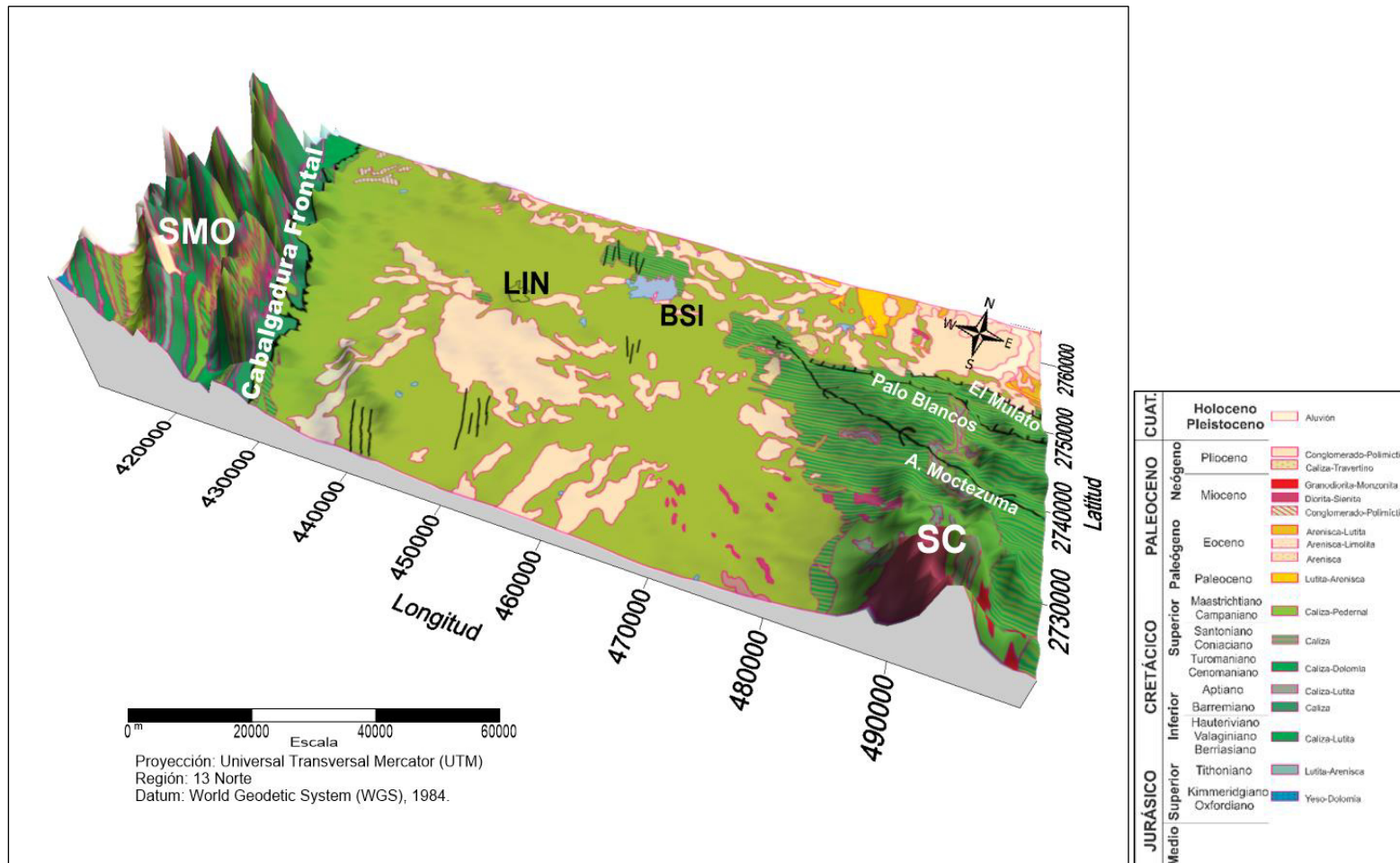


Figura 2.1. Modelo digital de elevación (INEGI, 2017) con la geología regional de la carta G14-11 del Servicio Geológico Mexicano. SMO = Sierra Madre Oriental. LIN = Linares. BSI = Baño San Ignacio. SC = Sierra de San Carlos.

KELLUM ET AL. (1938) describe la Sierra de San Carlos como una estructura de 60 kilómetros de largo y 40 kilómetros de ancho orientada NW-SE, cuya elevación es de 1066 m.s.n.m. Su génesis se relaciona con un grupo diques y sills que forman un lacolito tipo árbol de navidad, cuya composición varía de alcalinos a calco-alcalinos. BLOOMFIELD (1973) empleó el método Ar-K para determinar que su edad es de  $28 \pm 06$  M.a.

Durante el Pérmico y Triásico existía un límite convergente, producto de la subducción de la placa Farallón bajo el cartón de Norte América, que originó el emplazamiento de cuerpos graníticos y granodioríticos en el borde occidental del continente. Posteriormente, Triásico tardío-Caloviano, actuó un mecanismo tectónico distensivo que permitió el desarrollo del Golfo de México donde concurrían algunas islas formadas por elevaciones del basamento; en el noreste de México se encontraba la paleo-isla de San Carlos que formaba parte del archipiélago de Tamaulipas (GOLDHAMMER, 1999, PADILLA Y SÁNCHEZ, 2007, TORRES ET AL., 1999). En la *FIGURA 2.2* se muestra la evolución que tuvo la paleo-isla de San Carlos.

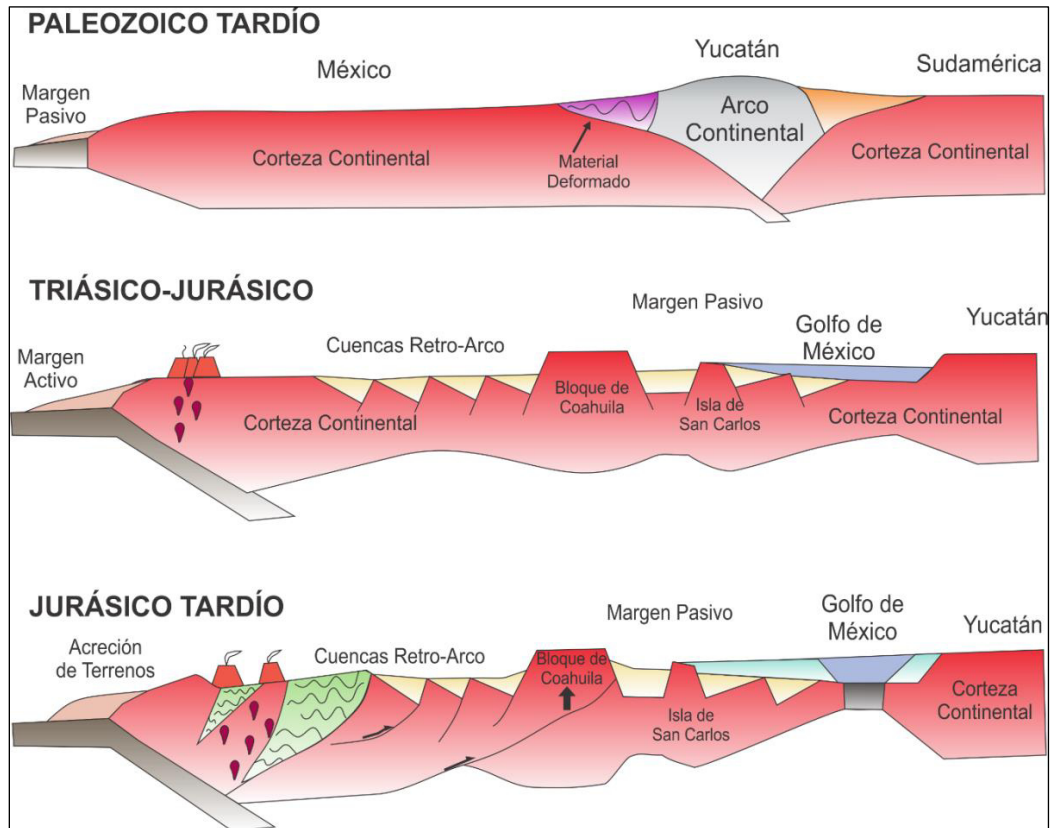


Figura 2.2. Secciones que muestran la evolución de la Isla de San Carlos desde el Paleozoico tardío hasta el Jurásico tardío. Tomado de Goldhammer (1999)

EGUILUZ (1989) menciona que, durante el esfuerzo convergente que originó la Sierra Madre Oriental, la isla de San Carlos actuó como un contrafuerte controlando la disposición estructural; así mismo, la distribución de las evaporitas fue un factor importante que intervino en la mecánica del plegamiento.

## 2.2.GEOLOGÍA LOCAL

En el área de estudio se pueden observar diversos afloramientos de las Formaciones San Felipe y Méndez. En la FIGURA 2.2 se muestra la geología del

área de estudio, en ella puede advertirse la presencia de terrazas aluviales y valles cubiertos por sedimentos cuaternarios. Las mayores elevaciones están representadas por los cerros Pontezuelas y El Avileño con 500 y 250 m.s.n.m., respectivamente; en su cresta están presentes calizas paleógenas de la Formación La Providencia (RODRÍGUEZ-PALACIOS, 1993).

En la *FIGURA 2.3* se observa que en la base de la columna litológica se encuentra la Formación San Felipe. Esta es descrita como una secuencia de calizas arcillo-margosas de color gris claro con intemperismo a verde, dispuestas en estratos delgados de 20 cm con intercalaciones de bentonita. Existen dos grupos de diaclasas, el primero orientado paralelamente al frente tectónico de la Sierra Madre Oriental, NNW-SSE, y el segundo es ortogonal, NNE-SWW (RODRÍGUEZ-PALACIOS, 1993).

El espesor estimado por RODRÍGUEZ-PALACIOS (1993) para esta unidad en la zona es de 115 metros, aunque el SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO (2017) reporta espesores máximos de 330 metros y mínimos de 5 metros. Al Sureste de la zona de estudio existen amplios afloramientos que forman pliegues suaves cuyos flancos buzan a 25°.

La zona de contacto entre la Formación San Felipe y Méndez es transicional y está formada por intercalaciones de calizas arcillosas con algunas bandas de pedernal blanco y horizontes lutíticos que aumenta su abundancia hacia la Formación Méndez (Rodríguez Palacios, 1993).

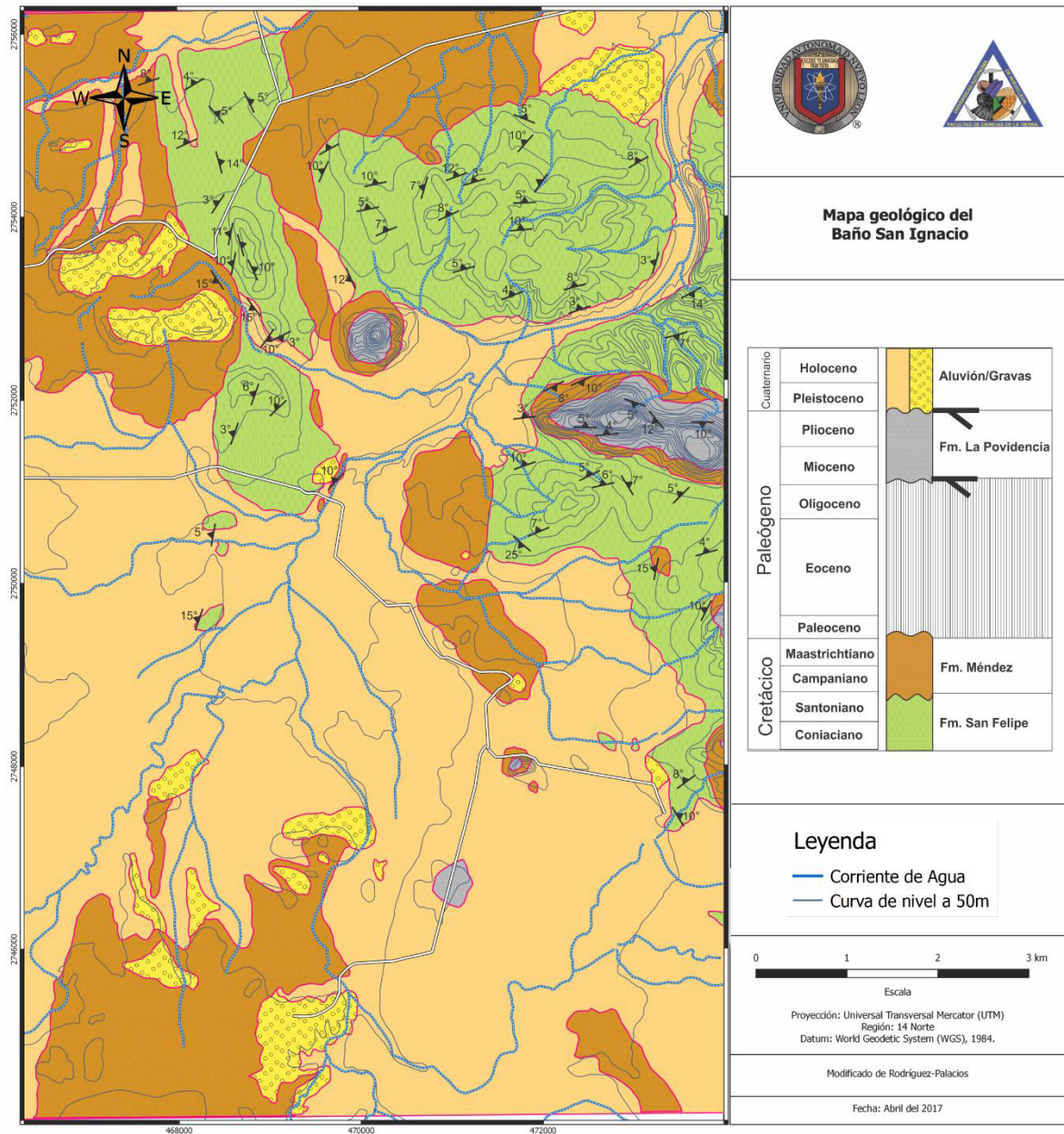


Figura 2.3. Mapa geológico local. Tomado de RODRÍGUEZ-PALACIOS (1993).

La Formación Méndez está compuesta por lutitas de color gris claro que intemperiza de café a gris verdoso, son muy deleznales y se resquebrajan en nódulos y sigmoides. Presenta un grupo de pequeñas fracturas y diaclasas



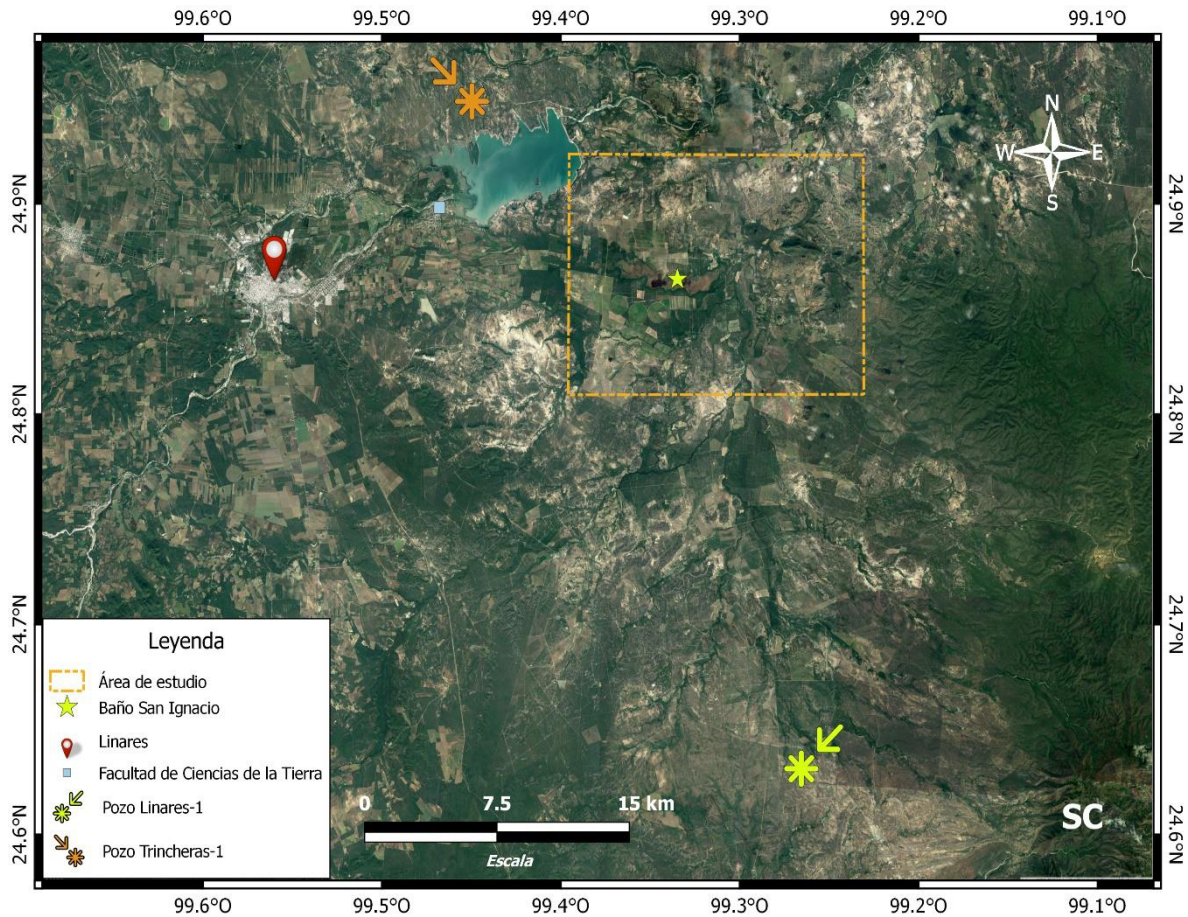
orientadas ENE-WSW, las cuales son rellenadas por calcita (Rodríguez Palacios, 1993). El SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO (2017) menciona que su espesor es muy variable, desde pocos metros hasta 300 metros.

Sobreyaciendo de manera discordante por erosión a la Formación Méndez, se encuentra un grupo de calizas conocido como Formación La Providencia. Estas calizas fueron depositadas en un ambiente lagunar durante el Mioceno y Plioceno, por lo tanto, su distribución geográfica es muy limitada (*FIGURA 2.3*).

Estas unidades están cubiertas, parcialmente, por un paquete de hasta 10 metros de espesor, de edad Cuaternaria, compuesto por gravas sub-redondeadas a redondeadas provenientes principalmente de calizas (Rodríguez Palacios, 1993).

La información geológica del área de estudio es ampliada con la descripción de núcleos de perforación (RIBA RAMÍREZ, 2010) extraídos en dos pozos realizados por PEMEX: Trincheras 1 localizado a 14.9 kilómetros hacia el Noroeste del Baño San Ignacio y, Linares 1 situado a 19.7 kilómetros al Sur del área de estudio (*FIGURA 2.4*).





*Figura 2.4. Mapa del área de estudio donde se muestra la ubicación de los pozos Trincheras-1 y Linares-1.*

La información de los pozos permitió definir las unidades presentes y su espesor, con ella se realizó las columnas estratigráficas de la *FIGURA 2.5* y *FIGURA 2.6*.

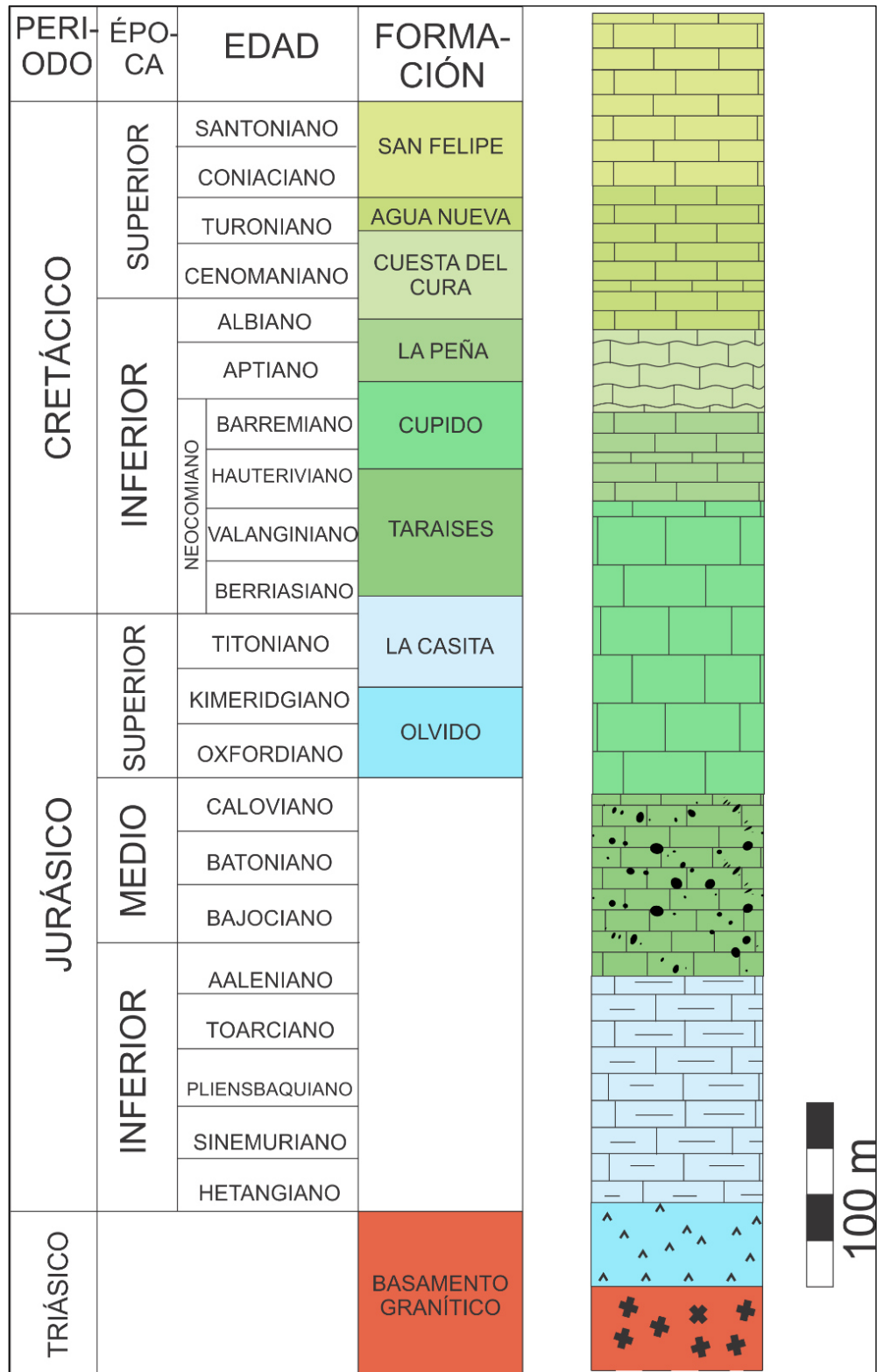


Figura 2.5. Unidades litológicas obtenidas en los núcleos extraídos del pozo Trincheras-1, así como su edad y espesor. Modificado de Riba (2010)

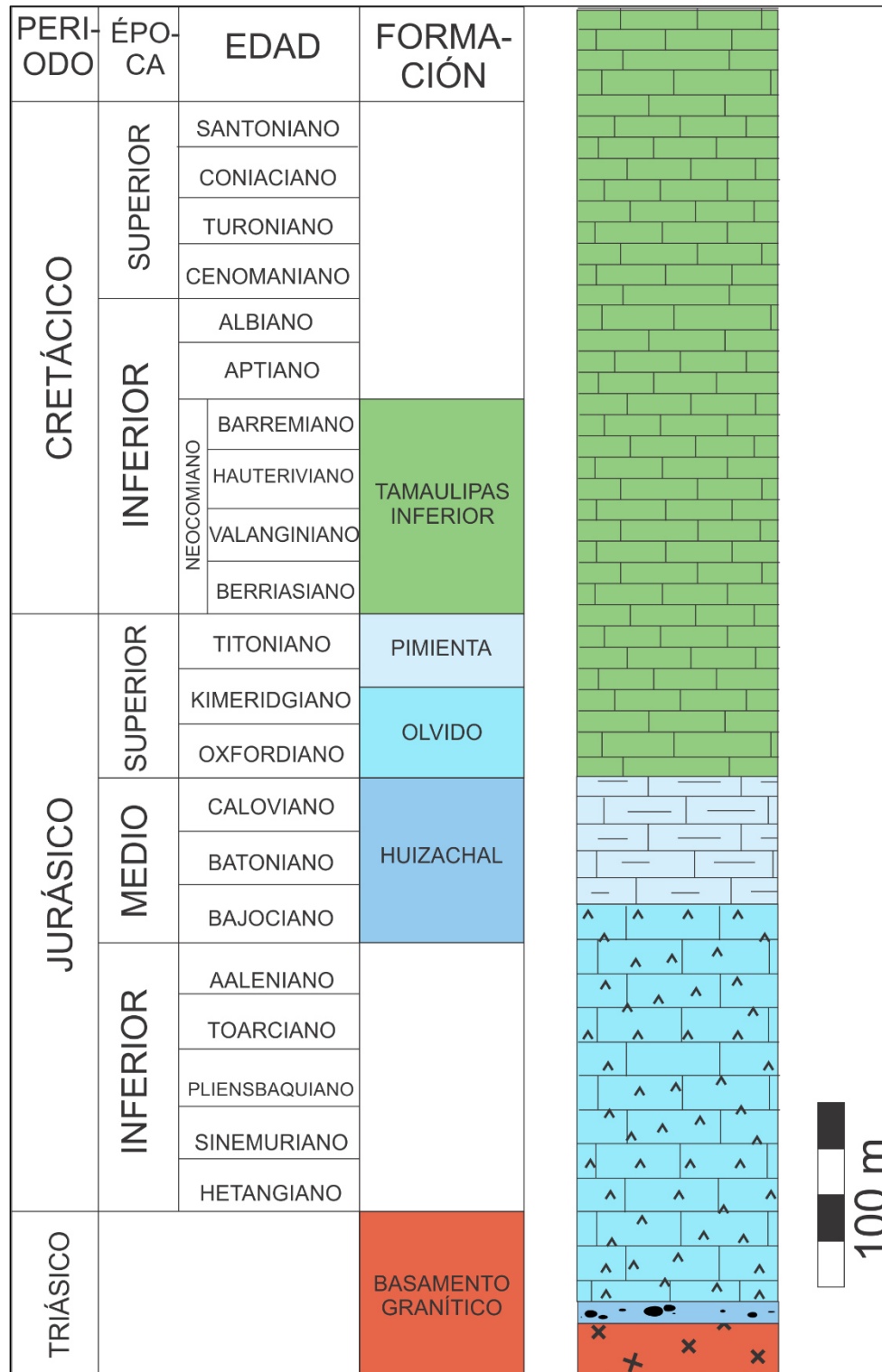


Figura 2.6. Unidades litológicas y edades obtenidas de los núcleos de perforación del pozo Linares-1. Modificado de Riba (2010).

En el pozo Linares-1 se identificó un basamento compuesto por granito de biotita a poco más de 2600 metros de profundidad. Sobre éste se reconoció un paquete de 4 metros de espesor formado por lechos rojos de la Formación Huizachal. Por encima de esta unidad, se identificaron 227 metros de calizas dolomitizadas con cristales de yeso e intercalaciones de evaporitas laminares pertenecientes a la Formación Olvido. Sobreyaciendo a las evaporitas, se reconocieron 72 metros de la Formación Pimienta que está compuesta por calizas arcillosas intercaladas con lutitas calcáreas de color gris oscuro a negro con material carbonoso, fracturas rellenas de calcita y escasa pirita. Arriba de la Formación Olvido se encontró un paquete de 441 metros de calizas tipo mudstone con porciones dolomitizadas, fracturas rellenas de calcita, pirita diseminada y microestilotitas, la cual se identificó como la Formación Tamaulipas Inferior.

Por su parte, en el pozo Trincheras-1 se identificó el basamento granítico a los 1162 metros de profundidad, sobre la cual está la Formación Olvido con un espesor de 77 metros. Sobreyaciendo a ésta se encontró una unidad de 205 metros de espesor formada por lutitas negras carbonosas, calizas de color gris oscuro a negro y escasas calizas oolíticas, pertenecientes a la Formación La Casita. Encima se identificaron calizas densas, ligeramente arenosas, cuya coloración varía de gris claro a oscuro y con escasas vetillas rellenas de calcitas; su espesor es de 165 metros y conforman la Formación Taraises. Sobre ésta se encontró la Formación Cupido cuyo espesor es de 265 metros; está compuesta por calizas de color gris oscuro, duras, densas, con algo de pedernal blanco y muy

escasas capas delgadas de lutita negra. Sobre esta Formación, se reconocieron 80 metros de caliza carbonosa de grano fino perteneciente a la Formación La Peña. Sobreyaciendo se encontró un paquete de 75 metros de calizas muy similares a las suprayacentes, sin embargo, su contenido fósil indica que se trata de la Formación Agua Nueva, Aurora o Cuesta del Cura. Finalmente, aflorando se reconoció a la Formación San Felipe, cuyo espesor es de 130 metros.

### 3. GEOFÍSICA

---

En el presente trabajo se realizó el modelado directo a través de los métodos potenciales: gravedad y magnetismo. Estas técnicas permiten identificar la existencia de una estructura cuya densidad y su susceptibilidad magnética contrasta con la de las rocas encajonantes, incluso si se encuentra a varios kilómetros de profundidad.

Para el análisis de los datos se desarrolló una interfaz gráfica en lenguaje del entorno de programación Matlab. La interfaz incluye una secuencia de correcciones y aplicaciones de filtros que realizan la separación regional-residual de anomalías magnéticas y de gravedad. Así mismo, se incluyen rutinas para calcular las anomalías gravimétricas y magnéticas a partir del contraste de densidad y susceptibilidad magnética de cuerpos irregulares representados

mediante polígonos bidimensionales (BLAKELY, 1996; WON & BEVIS, 1997). La interfaz también cuenta con rutinas para realizar la inversión mediante mínimos cuadrados y descomposición de valores singulares.

La precisión de los modelos obtenidos, al igual que todos los modelos geofísicos, está limitada por la tecnología disponible para la adquisición de los datos y las técnicas utilizadas para la inversión de los datos. Por otra parte, los modelos de densidad y susceptibilidad poseen una probable ambigüedad referida a la distribución de masa o del dipolo magnético mas no con su existencia y ubicación (Jacoby & Smilde, 2009).

### 3.1.METODOLOGÍA

Los métodos de gravedad y magnetismo, empleados en el presente estudio, se conocen como métodos potenciales puesto que, el potencial es una función que describe el comportamiento de un cuerpo bajo la influencia del campo magnético o gravitatorio. BLAKELY (1996) define al potencial  $\varphi$  como el trabajo  $W$  realizado al trasladar una masa  $m$ , desde el infinito hasta un punto arbitrario  $P$ , a través de un campo de fuerza  $\mathbf{F}$  (3-1).

$$\varphi(P) = W(P) = \int_{\infty}^P \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \quad (3-1)$$

donde:

$ds$  = desplazamiento de la partícula

Por lo que se refiere al potencial gravitatorio, el campo de fuerza está definido por la segunda ley de Newton (3-2):

$$F = -G \frac{mm_0}{r^2} \quad (3-2)$$

donde:

$G$  = constante de gravitación universal

$m$  y  $m_0$  = masa de la fuente

$r$  = distancia entre el centro de ambas masas

Respecto al potencial magnético, el campo de fuerza está determinado por la ley de Coulomb (3-3)

$$F = -k \frac{p p_0}{r^2} \quad (3-3)$$

donde:

$k$  = permeabilidad magnética

$P, P_0$  = intensidad de los polos

$r$  = distancia entre los polos

De acuerdo con KUMAR (2008), el campo magnético y gravitatorio son campos vectoriales y newtonianos.

Las estructuras geológicas, por tener masa y susceptibilidad magnética, generan su propio campo de fuerzas definido por sus propiedades físicas como: densidad, susceptibilidad y distribución espacial. En la prospección geofísica se busca la diferencia entre el campo teórico y el observado, la cual es generada por el contraste de dichas propiedades físicas entre las unidades geológicas de la corteza, esto se conoce como anomalías (KEAREY ET AL., 2002). En la *FIGURA 3.1.A* se muestra la anomalía gravimétrica producida por un cuerpo rectangular (*FIGURA 3.1.C*) de 500 metros de largo por 150 metros de ancho y densidad  $2.2 \text{ gm/cm}^3$ , enterrado a 100 metros de profundidad; así mismo, se muestra la anomalía magnética (*FIGURA 3.1.B*) producida por el mismo cuerpo, con susceptibilidad magnética de  $k = 1$ , ubicado en diferentes latitudes. Estas anomalías y los campos teóricos fueron calculados a partir de una rutina desarrollada en el entorno Matlab.



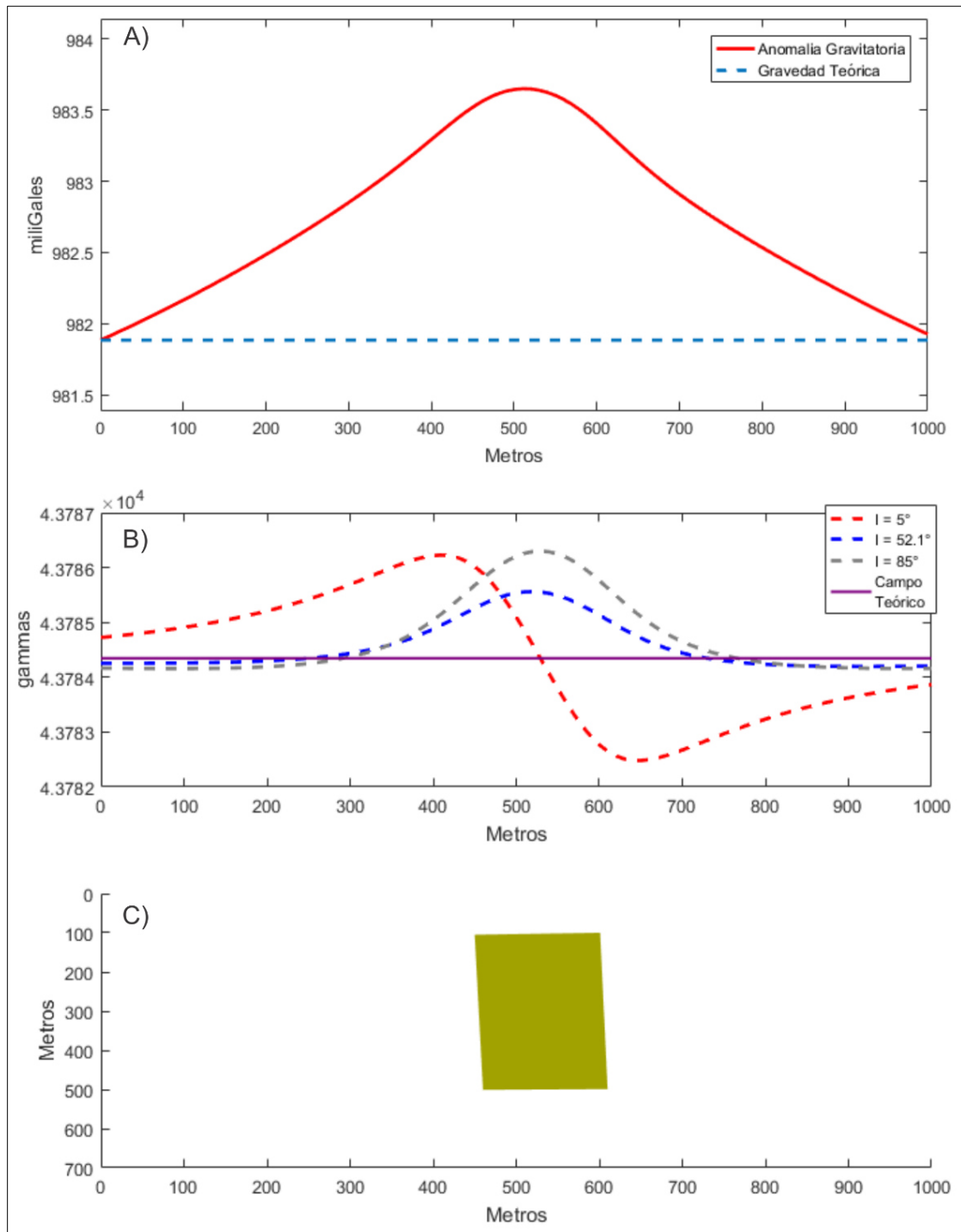
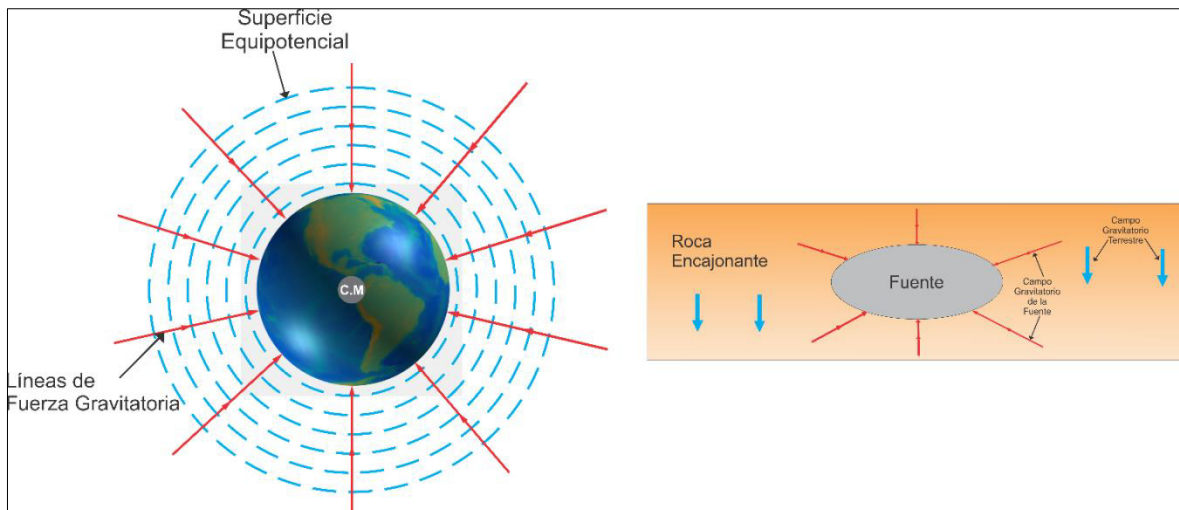
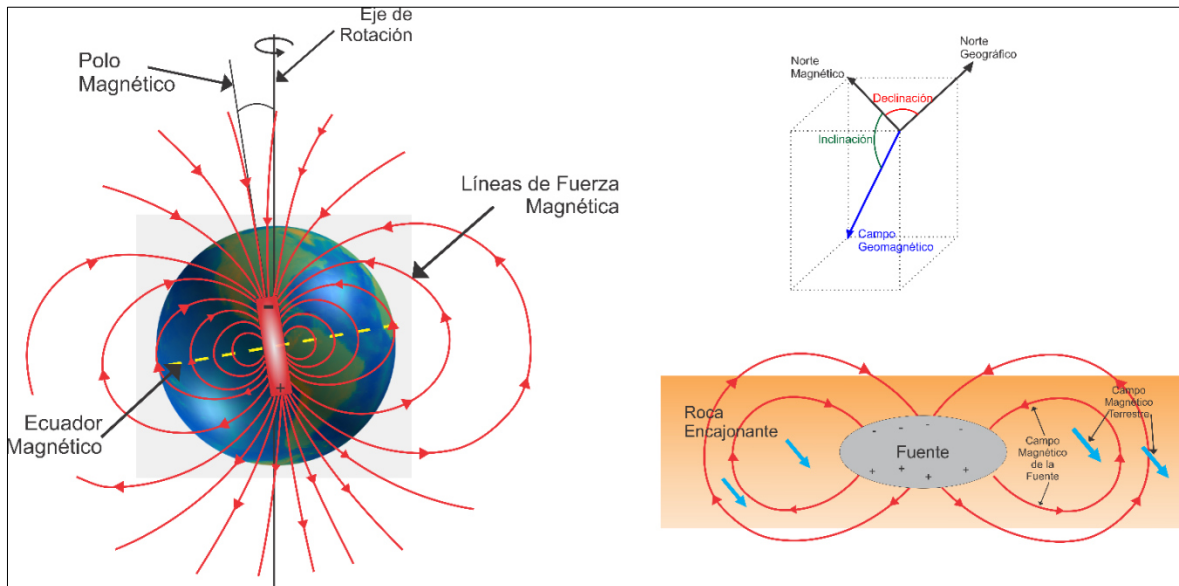


Figura 3.1. A) Anomalia gravimétrica producida por la masa de C) que se encuentra bajo las líneas del campo gravitatorio teórico para el área de estudio y, B) Intensidad del campo magnético producida por el cuerpo C) bajo el campo geomagnético teórico (línea morada). C) Cuerpo rectangular vertical con susceptibilidad de  $k = 1 \text{ S.I}$  y densidad de  $\rho = 2.2 \text{ gr/m}^3$ .

Como se observa en la *FIGURA 3.1* el campo magnético es más complejo que el de gravedad, esto se debe a que las líneas del campo gravitatorio ejercen su fuerza únicamente hacia el centro de la tierra, su intensidad solo varía si lo hace la distancia entre centro de la Tierra y la masa sobre la que actúa (*FIGURA 3.2*). Por el contrario, la dirección de las líneas de fuerza que genera el campo geomagnético varía, en el ecuador son tangenciales a la superficie terrestre; mientras que en los polos son perpendiculares a la superficie. Por tal motivo, la intensidad que este campo ejerce sobre un cuerpo con susceptibilidad magnética es la resultante de la inclinación y declinación (*FIGURA 3.3*).



*Figura 3.2. Las líneas del campo gravitatorio producido por la tierra están dirigidas hacia su centro. Un cuerpo en el subsuelo también produce líneas de campo gravitatorio dirigidas hacia su centro de masa, a su vez, está bajo influencia del campo gravitatorio terrestre. Modificado de Dentith y Mudge (2014).*



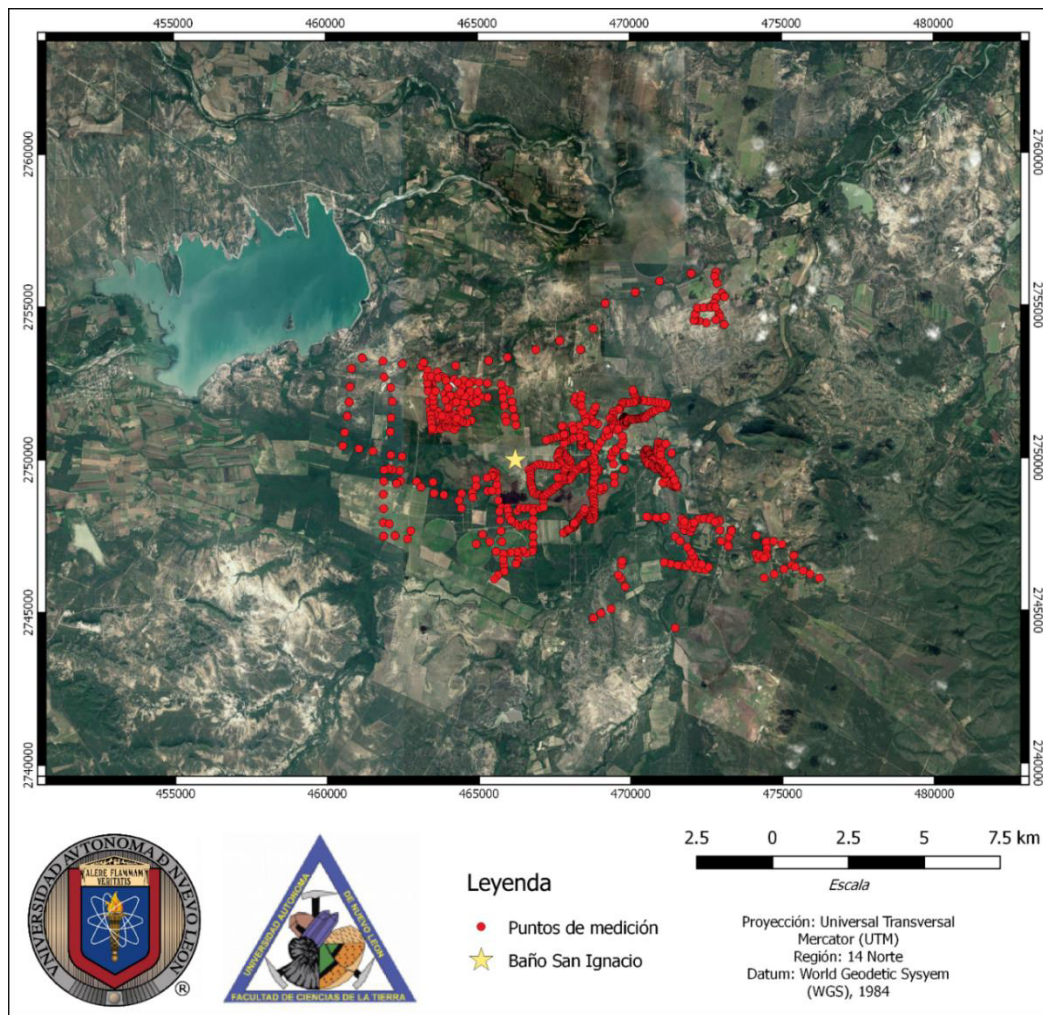
*Figura 3.3. Las líneas del campo geomagnético son verticales en los polos y horizontales en el ecuador magnético, por lo tanto, la intensidad del campo que afecta a un cuerpo susceptible es la resultante de la declinación y la inclinación de dicho campo. El campo magnético producido por un cuerpo magnetizado por el campo geomagnético depende de su ubicación geográfica. Modificado de Dentith y Mudge (2014).*

## 3.2.ADQUISICIÓN DE DATOS

### 3.2.1. DATOS DE CAMPO MAGNÉTICO TOTAL

Los datos magnéticos se obtuvieron a partir 2,451 mediciones localizadas alrededor del manantial Baño San Ignacio, con el objetivo de delimitar las estructuras con un enfoque semi-regional, principalmente la distribución del basamento mediante técnicas de modelado magnético. Así mismo, se cuidó que en los puntos de adquisición no existieran fuentes de ruido antropogénico.

Con estos datos se cubrió un área de 163.714 km<sup>2</sup> delimitada por un polígono cuyas coordenadas son: -99.39371°, 24.80862° SW; -99.22986°, 24.81241° SE; -99.24771°, 24.92343° NE y -99.39487°, 24.90693° NW. En la *FIGURA 3.4* se muestra la ubicación donde se adquirieron los datos de campo magnético total con círculos sólidos rojos.



*Figura 3.4. Mapa del área de estudio, se muestran los puntos donde fueron adquiridos los datos de campo magnético total.*

Para la adquisición de estos datos se empleó un magnetómetro de precesión de protones marca Gem-System modelo GSM-19t, el cual tiene una sensibilidad de 0.01 gammas (*FIGURA 3.5*). Así mismo, cuenta con un sistema de posicionamiento global (GPS) que permite georreferenciar las mediciones.



*Figura 3.5. Magnetómetro Overhauser GSM-19 marca GemSystems utilizado durante la adquisición de datos de campo magnético total.*

### 3.2.2. DATOS GRAVIMÉTRICOS

Los datos de gravedad fueron tomados del modelo de la anomalía de Bouguer realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017). Este modelo está realizado a partir de datos de gravedad adquiridos por dicho organismo durante diversas campañas a lo largo de todo el territorio mexicano, por lo que se seleccionaron solamente los datos localizados dentro del área de estudio; es decir, aquellos entre las coordenadas:  $-99.39562^{\circ}$ ,  $24.80604^{\circ}$  SW;  $-99.22268^{\circ}$ ,  $24.80602^{\circ}$  SE;  $-99.22301^{\circ}$ ,  $24.93757^{\circ}$  NE y  $-99.39579^{\circ}$ ,  $24.93753^{\circ}$  NW. Estos datos se muestran en la *FIGURA 3.6*.

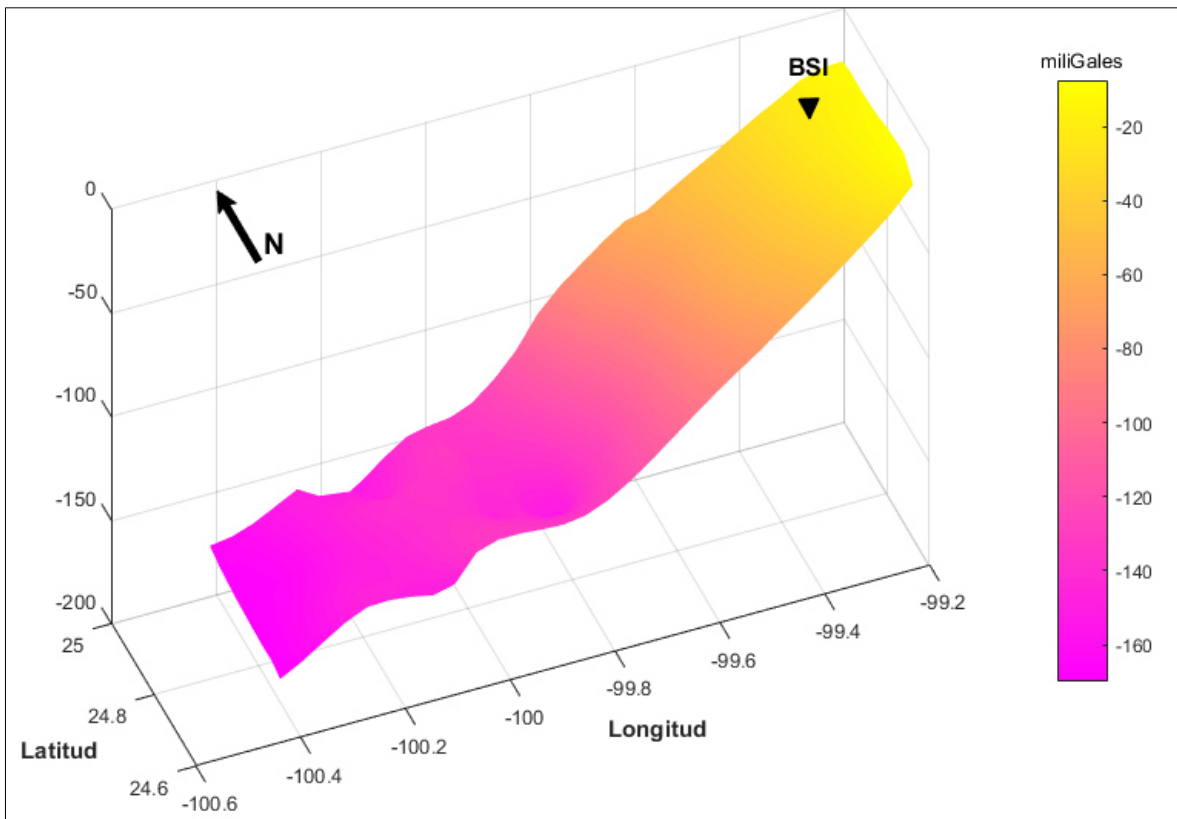


Figura 3.6. Anomalía de Bouguer generada con datos de INEGI. **BSI**=Baño San Ignacio.

### 3.3.CAMPOS RESIDUALES

Los datos de campo magnético total y de aceleración de la gravedad son generados por múltiples fuentes según cada caso, cada una contribuye de tal manera que, por principio de superposición, generan una sola respuesta. Con el objetivo de obtener la anomalía residual se filtraron estos efectos mediante las rutinas incorporadas a la interfaz desarrollada.



### 3.3.1. ANOMALÍA MAGNÉTICA RESIDUAL

Para obtener la anomalía residual del campo magnético en áreas relativamente extensas, DENTITH Y MUDGE (2014) mencionan que se debe calcular la intensidad del campo teórico en cada punto donde se haya realizado la adquisición a partir del Campo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF) y, sustraer ese valor del dato medido. Aunque existen otros filtros, este método tiene ventajas cuando los datos se han adquirido en largos periodos o no continuos debido a que considera las variaciones seculares del campo principal.

El modelo del IGRF describe el potencial magnético  $V^i$  producido por un dipolo ubicado en el centro de la tierra, a partir de funciones armónicas (3-4).

$$V^i = a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (g_n^{mi} \cos m\varphi + h_n^{mi} \sin m\varphi) P_n^m(\theta) \quad \text{para } n = 0, 1 \quad (3-4)$$

donde:

$a$  = radio de la Tierra

$\theta$  = colatitud de los puntos de medición

$\varphi$  = longitud de los puntos de medición

$P_n^m$  = polinomio de Legendre

$g_n^{mi}$  y  $h_n^{mi}$  son los coeficientes armónicos de Gauss

Los valores de los coeficientes de Gauss son actualizados cada 5 años debido al cambio en la orientación del campo dipolar en la Tierra, estas actualizaciones corresponden a la época del IGRF. Este modelo puede extenderse para describir la componente del campo magnético total originado fuera de la Tierra; sin embargo, no se consideró debido a que su contribución con el campo magnético total es menor del 10% (Lowrie, 2007).

A la interfaz de procesado se le implementó una rutina de la División para Modelado del Campo Geomagnético de la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA-VMOD, 2012), la cual calcula y corrige el valor para cada medición (ANEXO I) usando los coeficientes de Gauss de la época 2014. La media del IGRF obtenida con esta rutina, a partir de 1,663 datos, es 43,784.3454 gammas y la desviación estándar de 30.6410 gammas.

Los cambios topográficos pueden ocasionar variaciones importantes cuando la susceptibilidad de las estructuras es alta. No obstante, cuando las elevaciones están constituidas por litologías sedimentarias no se observa distorsión significativa en el campo magnético debido a su baja susceptibilidad.

Existen diversos procesos de filtrado mediante los cuales es posible realzar cierta característica específica de la anomalía residual; sin embargo, en la *FIGURA 3.7* se aprecia claramente la anomalía sin necesidad de aplicar más filtros.



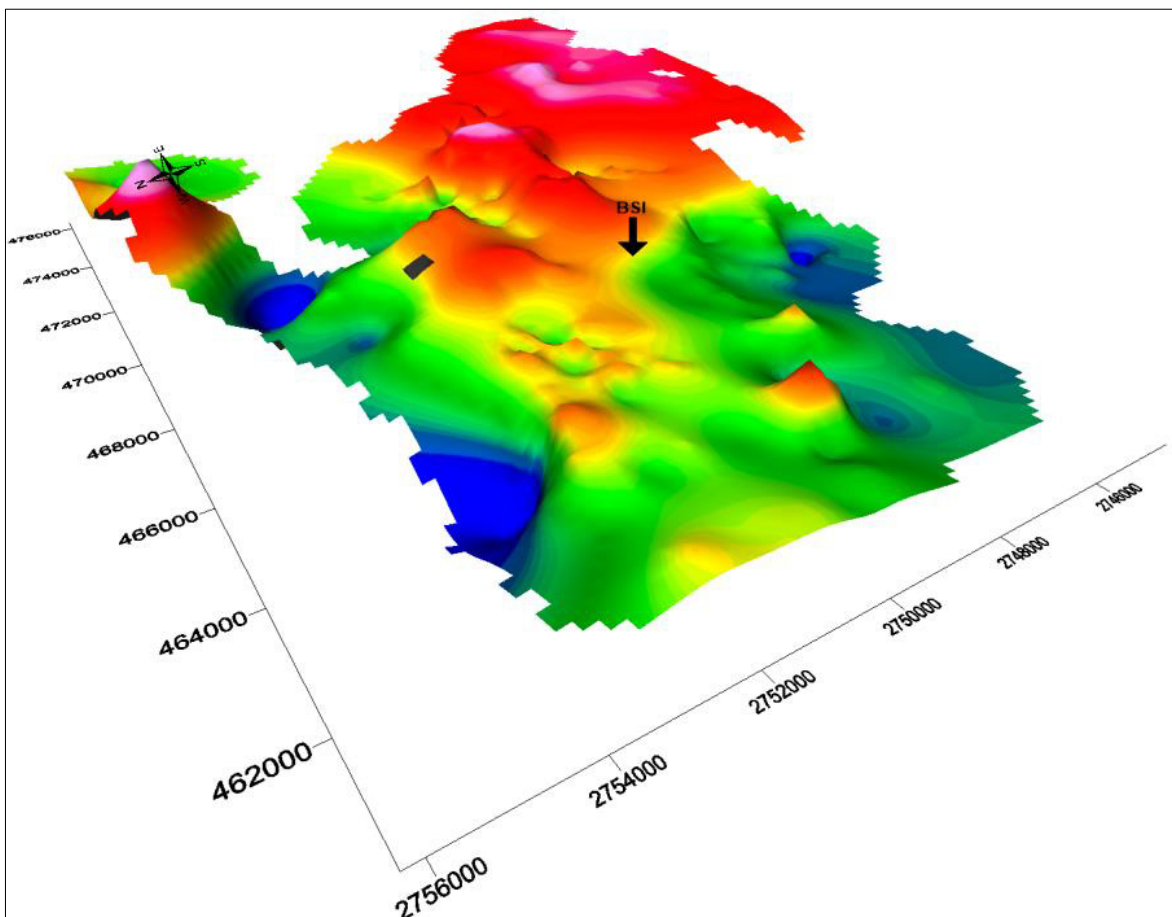


Figura 3.7. Mapa de anomalía magnética residual de la zona de estudio. BSI = Baño San Ignacio.

### 3.3.2. ANOMALÍA GRAVIMÉTRICA RESIDUAL

AGOCs (1951) menciona que la anomalía residual  $R$  de un campo potencial es descrita como la desviación de una superficie  $Z$  con el valor de la media regional  $G$ . Si el gradiente del campo se presenta como un plano uniforme en las coordenadas  $x, y$ , entonces la anomalía residual se puede obtener mediante (3-5)

$$R = G - Z = G - (Ax + By + C) \quad (3-5)$$

donde:

$A, B, C$  son constantes a determinar.

De acuerdo con el interés del estudio geofísico y las características de las observaciones, se pueden ajustar superficies regionales de orden superior mediante técnicas de regresión polinomial. Los valores de gravedad en el área estudiada presentan una tendencia lineal, por lo cual se anexó a la interfaz de procesado una rutina (ANEXO II) que separa las componentes mediante (3-5).

Para obtener la superficie regional se generó un sistema de tres ecuaciones con las que se construye la matriz aumentada (3-6), posteriormente se resuelve con el método de Gauss-Jordan para obtener las constantes. Este método se conoce como mínimos cuadrados.

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x & \sum_{i=1}^n y \\ \sum_{i=1}^n x & \sum_{i=1}^n x^2 & \sum_{i=1}^n xy \\ \sum_{i=1}^n y & \sum_{i=1}^n xy & \sum_{i=1}^n y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n G \\ \sum_{i=1}^n xG \\ \sum_{i=1}^n yG \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

donde:

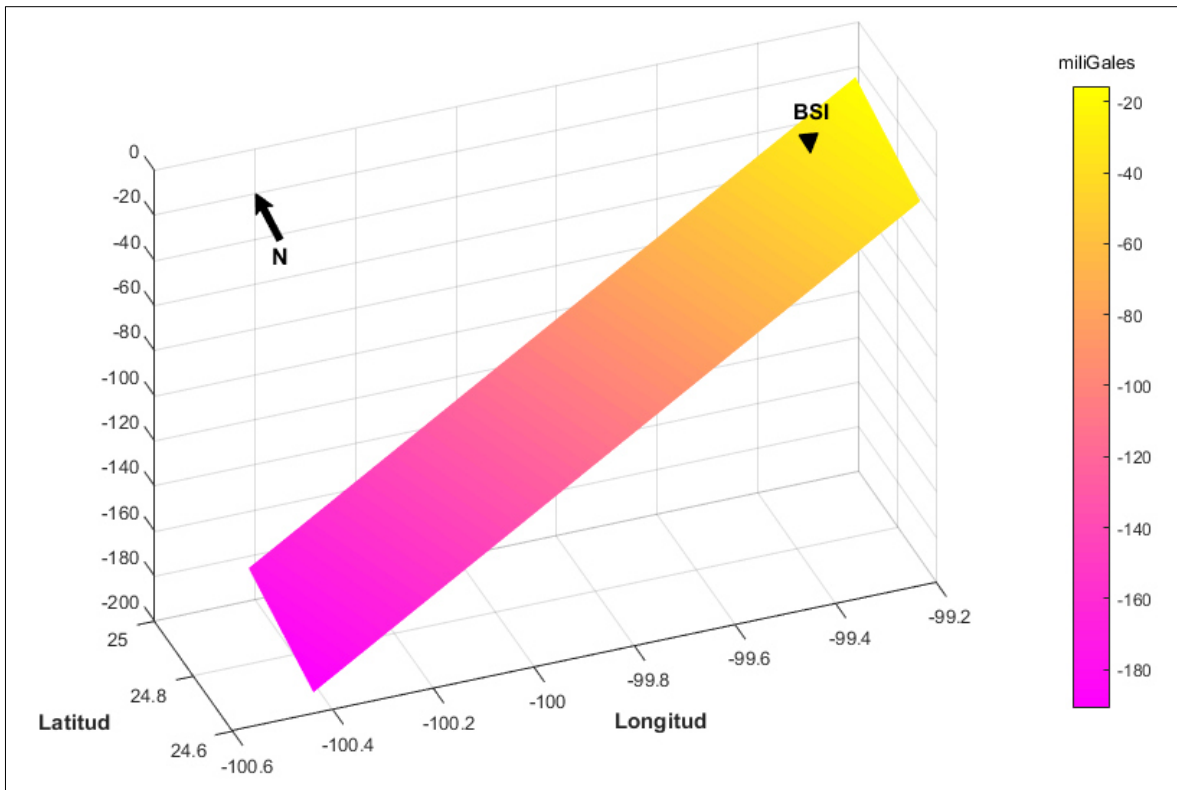
$n$  = número de datos

$x$  = longitud de los datos observados

$y$  = laltitud de los datos observados

$G$  = valor de los datos observados

En la *FIGURA 3.8* se muestra el plano regional que se presenta como una superficie de primer orden con rumbo NW-SE y buzamiento SW, cuyas constantes que la describen son:  $A = 133.1160$ ;  $B = 43.8074$ ; y  $C = 12101.05$ .



*Figura 3.8. Plano lineal ajustado para remover el efecto regional de la anomalía de Bouguer. **BSI**=Baño San Ignacio.*

Con este filtro se obtiene la anomalía de Bouguer residual que se muestra en la *FIGURA 3.9*.

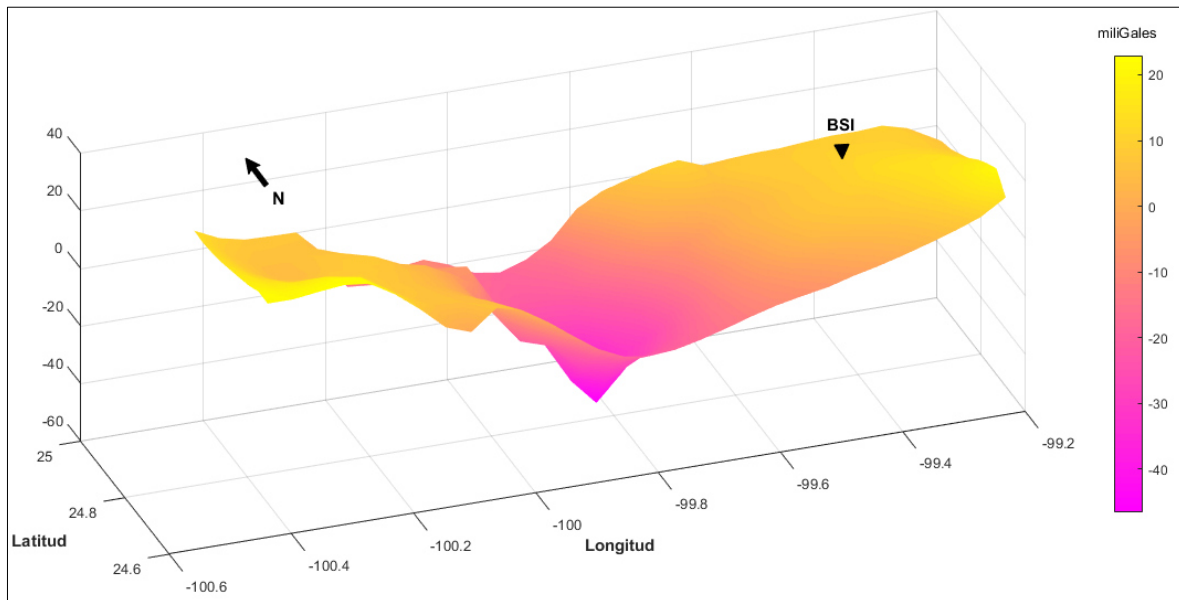


Figura 3.9. Anomalía de Bouguer residual. **BSI**=Baño San Ignacio.

### 3.4. MODELADO DIRECTO

El propósito del modelado geofísico es relacionar la distribución espacial de las estructuras con los valores de campo magnético y gravitatorio observados. En general, las propiedades físicas de la fuente son demasiado complejas por lo que se suelen sintetizar en un conjunto de parámetros que las representen (Dentith & Mudge, 2014). Una ventaja del modelado de datos potenciales es que los cuerpos complejos de gran tamaño pueden simplificarse en elementos geométricos simples de menor tamaño lo cual reduce el proceso (Jacoby & Smilde, 2009).

Para realizar un modelado es necesario comprender la dependencia de las propiedades físicas del sistema con los datos observados mediante un sistema de ecuaciones que constituyen el modelado directo (Meju, 1994).

El procedimiento para realizar un modelado directo (FIGURA 3.10) comienza suponiendo un modelo inicial a partir en la información geológica disponible y, la respuesta geofísica conocida de algunos cuerpos simples. Posteriormente, se calcula su respuesta y se compara con los datos observados, si existe una diferencia se ajustan los parámetros para tratar de reducir esta diferencia. El proceso se repite hasta que la respuesta calculada y la observada sean lo suficientemente similares (Blakely, 1996).

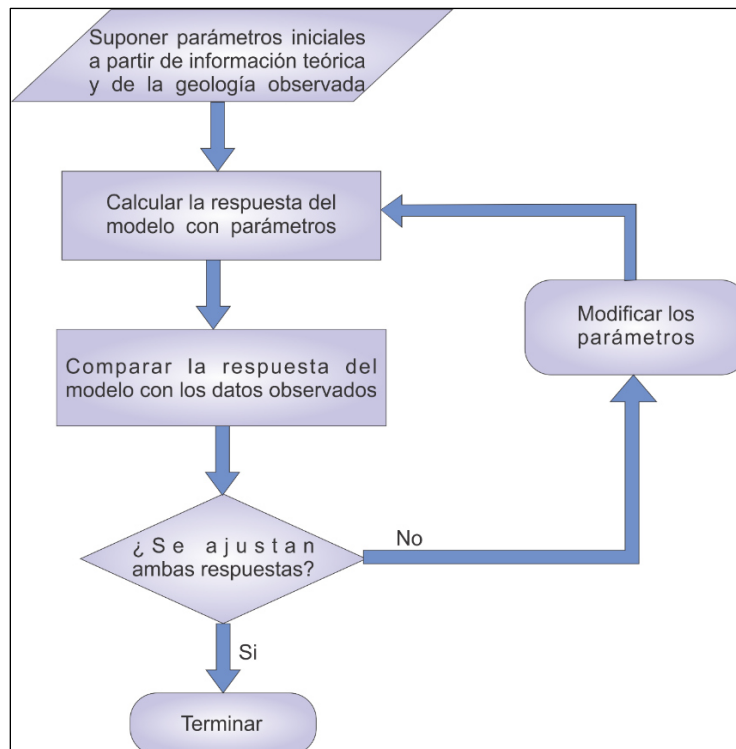


Figura 3.10. Diagrama de flujo para realizar un modelo directo. Tomado de BLAKELY (1996).

### 3.4.1. MODELADO MAGNÉTICO

Existen diversos enfoques de parametrizar la geometría de las estructuras con el propósito de realizar el modelado magnético, una manera muy eficaz es obtener secciones transversales de las estructuras geológicas complejas y remplazarlas con polígonos simplificados bidimensionales (FIGURA 3.11).

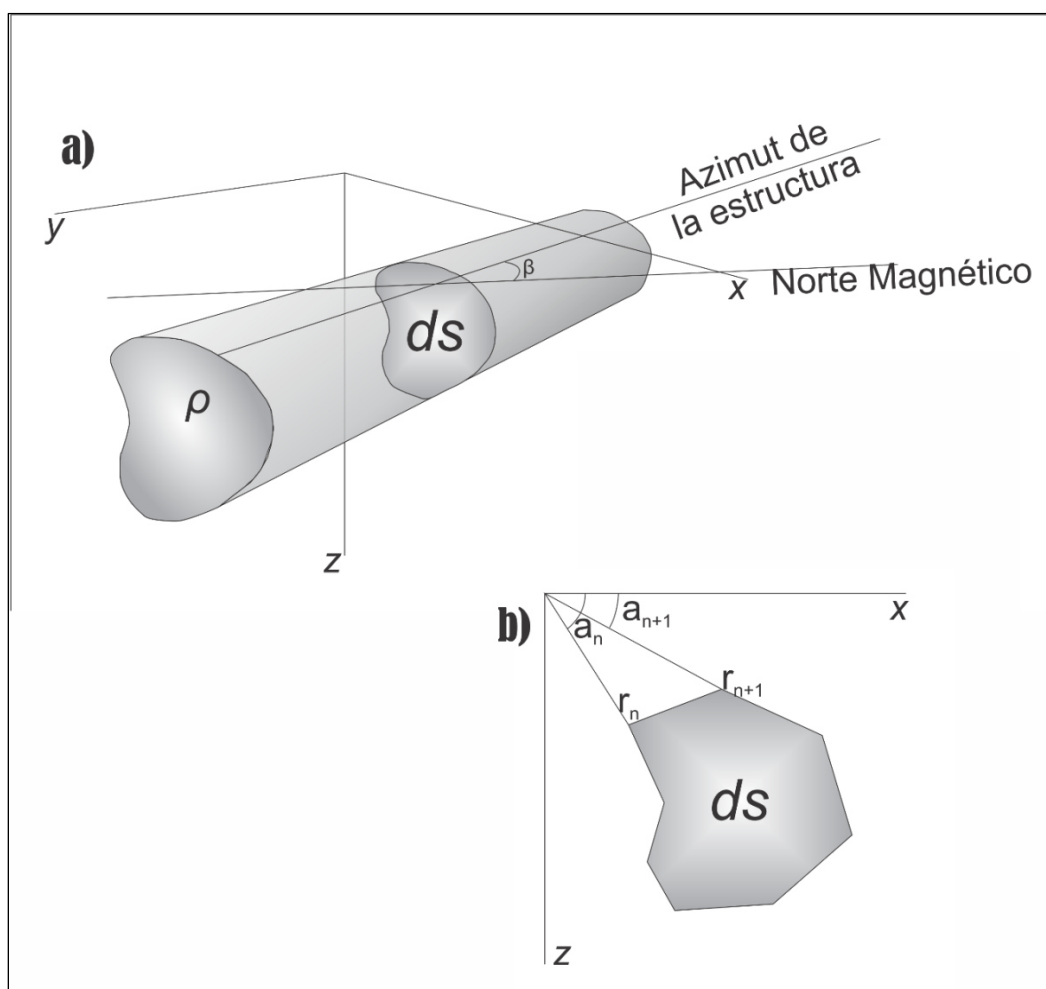


Figura 3.11. **a)** Esquema de una figura tridimensional de la que se extrae una sección transversal para aproximar su geometría con, **b)** un polígono bidimensional de  $N$ -lados simplificado. Modificada de BLAKELY (1996).

En este método TALWANI, ET AL. (1959) demostró que las componentes, vertical (3-7) y horizontal (3-8) de la atracción gravitatoria, se puede calcular realizando una integral de línea con el perímetro del polígono de la FIGURA 3.12

$$\Delta g_z = 2G\rho \oint z d\theta = 2G\rho \oint x \tan \theta d\theta \quad (3-7)$$

$$\Delta g_x = 2G\rho \oint x d\theta = 2G\rho \oint z \tan^{-1} \theta d\theta \quad (3-8)$$

donde:

$G$  = constante de gravitación universal

$\rho$  = densidad del cuerpo

$\theta$  = ángulo entre el punto de observación y un vértice del polígono, FIGURA 3.12

A partir de las expresiones (3-7) y (3-8), WON & BEVIS (1987) uso la relación de Poisson para desglosar la anomalía magnética  $\Delta H$  que produce un polígono magnetizado por el campo terrestre, generando (3-9)

$$\Delta H = \frac{kH_e}{G\rho} \frac{\partial}{\partial \alpha} \Delta g \quad (3-9)$$

donde:

$\Delta H$  = vector de anomalía magnética.

$\Delta g$  = vector de la anomalía de gravedad.

$k$  = susceptibilidad magnética del polígono.

$\rho$  = densidad del polígono.

$H_e$  = intensidad del campo geomagnético teórico según la ubicación del polígono.

$\alpha$  = dirección de la magnetización inducida.

A su vez, esta anomalía magnética tiene su componente vertical  $\Delta H_z$  (3-10) y horizontal  $\Delta H_x$  (3-11).

$$\Delta H_z = \frac{kH_e}{G\rho} \frac{\partial}{\partial \alpha} \Delta g_z \quad (3-10)$$

$$\Delta H_x = \frac{kH_e}{G\rho} \frac{\partial}{\partial \alpha} \Delta g_x \quad (3-11)$$

Dado que la dirección  $\alpha$  del campo magnético inducido depende de la inclinación magnética  $I$  y el azimut  $\beta$  de la estructura (3-12)

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \equiv \sin I \frac{\partial}{\partial z} + \sin \beta \cos I \frac{\partial}{\partial x} \quad (3-12)$$

Las ecuaciones (3-10) y (3-11) se reescriben como (3-13) y (3-14)

$$\Delta H_z = 2kH_e \left( \sin I \frac{\partial \Delta g_z}{\partial z} + \sin \beta \cos I \frac{\partial \Delta g_z}{\partial x} \right) \quad (3-13)$$



$$\Delta H_x = 2kH_e \left( \text{sen } I \frac{\partial \Delta \mathbf{g}_x}{\partial z} + \text{sen } \beta \cos I \frac{\partial \Delta \mathbf{g}_x}{\partial x} \right) \quad (3-14)$$

WON Y BEVIS (1997) formaliza las ecuaciones (3-7) y (3-8) de la manera (3-15) y (3-16).

$$\Delta \mathbf{g}_z = 2G\rho \sum_{i=1}^n A \left[ (\theta_n - \theta_{n+1}) + B \ln \frac{r_{n+1}}{r_n} \right] \quad (3-15)$$

$$\Delta \mathbf{g}_x = 2G\rho \sum_{i=1}^n A \left[ -(\theta_n - \theta_{n+1})B + \ln \frac{r_{n+1}}{r_n} \right] \quad (3-16)$$

donde:

$$A = \frac{(x_{n+1} - x_n)(x_n z_{n+1} - x_{n+1} z_n)}{(x_{n+1} - x_n)^2 + (z_{n+1} - z_n)^2}$$

$$B = \frac{z_{n+1} - z_n}{x_{n+1} - x_n}$$

$$r_j^2 = x_j^2 + z_j^2 \quad \text{para } j=1,2$$

$$\theta_j = \tan^{-1} \left( \frac{z_j}{x_j} \right) \quad \text{para } j=1,2$$

Por lo tanto, el polígono de la *FIGURA 3.11*, cuya geometría está descrita por los parámetros  $(x_n, z_n)$  y  $(x_{n+1}, z_{n+1})$ , causará una anomalía magnética  $\Delta H$  (3-17)

$$\Delta H = \Delta H_z \operatorname{sen} I + \Delta H_x \operatorname{sen} \beta \cos I \quad (3-17)$$

Así mismo, WON Y BEVIS (1987) elabora una rutina en Fortran que calcula la respuesta magnética de polígonos irregulares de n-lados a partir de (3-17). Esta rutina se modificó para implementarse dentro de la interfaz de procesamiento, desarrollada en el presente trabajo, con la que se realizó el modelado magnético (ANEXO III).

#### 3.4.2. MODELADO DE GRAVEDAD

Para modelar la distribución de masa que produce una anomalía gravitatoria se han desarrollado diversas metodologías. Algunas representan a toda la superficie mediante celdas cuyas propiedades físicas internas son homogéneas y contrastan con las de las celdas vecinas; sin embargo, para modelar estructuras complejas la cantidad de celdas debe incrementar considerablemente, al igual que el número de parámetros y el tiempo de cómputo (DENTITH & MUDGE, 2014).

Otro enfoque más eficaz es fraccionar a los cuerpos de geometría compleja en secciones transversales bidimensionales delimitadas por polígonos más simples (FIGURA 3.11). La ventaja de este método es que los polígonos pueden contener tantos lados como sea necesario para adaptarse a la forma de las estructuras seccionadas, sin limitar su tamaño o posición (TALWANI ET AL., 1959).

De esta manera, los parámetros que describen la distribución de masa quedan definidos por cada vértice del polígono.

BLAKELY (1996) menciona que la atracción gravitatoria  $g$  producida por un polígono de dos dimensiones con geometría irregular es la componente vertical del potencial gravitatorio sobre su superficie (3-18).

$$g = \frac{\partial U}{\partial z} = 2\gamma\rho \iint \frac{z'}{x'^2 + z'^2} dx' dz' \quad (3-18)$$

donde:

$\gamma$  = constante de gravitación universal

$\rho$  = densidad del polígono

Integrando (3-18) con respecto a  $x'$  se obtiene (3-19), la cual es una expresión similar a las ecuaciones (3-7) y (3-8) desarrolladas por TALWANI ET AL. (1959), sin embargo, su solución la plantean de diferente manera.

$$g = 2\gamma\rho \oint \tan^{-1} \frac{x'}{z'} dz' \quad (3-29)$$

BLAKELY (1996) menciona que cada N-lado del polígono forma una línea entre las coordenadas  $z_n$  y  $z_{n+1}$ , entonces  $x'$  se puede expresar con la ecuación de una línea (3-20)

$$x' = \alpha_n z' + \beta_n \quad (3-20)$$

cuya pendiente ( $\alpha_n$ ) e intercepto ( $\beta_n$ ) son (3-21) y (3-22)

$$\alpha_n = \frac{x_{n+1} - x_n}{z_{n+1} - z_n} \quad (3-21)$$

$$\beta_n = x_n - \alpha_n z_n \quad (3-22)$$

Sustituyendo (3-20) en la integral (3-19) se obtiene (3-23)

$$g = 2\gamma\rho \sum_{n=1}^N \int_{z_n}^{z_{n+1}} \tan^{-1} \frac{\left(\frac{x_{n+1} - x_n}{z_{n+1} - z_n}\right) z' + (x_n - \alpha_n z_n)}{z'} dz' \quad (3-23)$$

Integrando con respecto a  $z$  se obtiene (3-24)

$$g = 2\gamma\rho \sum_{n=1}^N \frac{\beta_n}{1 + \alpha_n^2} \left[ \log \frac{\sqrt{x_{n+1}^2 + z_{n+1}^2}}{\sqrt{x_n^2 + z_n^2}} - \alpha_n \left( \tan^{-1} \frac{z_{n+1}}{x_{n+1}} - \tan^{-1} \frac{z_n}{x_n} \right) \right] \quad (3-34)$$

que describe la relación entre la anomalía gravitatoria y un polígono de forma irregular definida por los parámetros  $(x_n, z_n)$  y  $(x_{n+1}, z_{n+1})$ .

BLAKELY (1996) formuló una rutina para Fortran que calcula la gravedad producida por un polígono de N-lados y geometría arbitraria a partir de la ecuación (3-24). Se modificó esta rutina (ANEXO IV) para incorporarse a la interfaz de procesamiento y realizar el modelo gravimétrico directo.

### 3.5. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Como se definió previamente, el modelado directo se desarrolla a partir de un sistema de ecuaciones que relacionan a los parámetros que describen al sistema y la respuesta generada. Por el contrario, el modelado inverso es la inferencia de dichos parámetros a partir de los datos observados, para lo cual se cuentan con diversas metodologías matemáticas como el cálculo, estadística y álgebra lineal.

MEJU (1994) menciona que la respuesta de un modelo geofísico unidimensional puede ser descrita como (3-25)

$$d_i = \int_0^z K_i(z) p(z) dz \quad (3-25)$$

donde:

$d_i$  = las observaciones

$p(z)$  = función relacionada con alguna propiedad física de la tierra o parámetros

$K_i$  = kernel de los datos y describe la relación entre los datos observados y la función  $p(z)$ .

Si la respuesta del modelo incluye variables continuas el problema inverso es continuo y definido por (3-25). Por otro lado, en sistemas donde los datos observados son discretos se conoce como problema discreto inverso o un problema de estimación de parámetros (ASTER ET AL., 2013). MENKE (2012) define el problema inverso discreto como una ecuación lineal (3-26)

$$G_{ij} m_j = d_i \quad (3-26)$$

donde:

$d$  = vector que contiene las  $i$ -observaciones

$m$  = vector con los  $j$ -parámetros que describen al sistema

$G$  = matriz que define la relación entre los parámetros y los datos.

Cuando existen más observaciones que parámetros en el sistema se dice que es un problema sobre determinado; si el número de parámetros es mayor a los datos observados se trata de un problema bajo determinado; en cambio, el problema bien determinado es aquel donde la cantidad de datos observados y de

parámetros es igual. Esta clasificación es importante debido a que la solución de cada uno es distinta.

En el modelado de gravedad y magnetismo, el número de observaciones siempre es mayor al número de parámetros a estimar; es decir, son problemas sobre determinados. Adicionalmente, la respuesta de estos modelos depende de la posición del punto de observación  $P$  y de la distribución espacial de la fuente  $Q$  que produce el campo; es decir, que la relación  $K_i(P, Q)$  es no lineal. La forma de evitar esto es simplificar los parámetros suponiendo que de algún modo son constantes (Blakely, 1996).

El presente trabajo tiene por objetivo establecer la distribución espacial de las estructuras a partir de la intensidad del campo gravitatorio y magnético generada por un polígono bidimensional de  $N$ -lados de acuerdo con las ecuaciones (3-17) y (3-24). La relación entre los parámetros geométricos de estas expresiones es no-lineal dado que están definidos por los logaritmos, ángulos y arcotangentes de dos vértices.

El primer paso para resolver esta inversión es linealizar la relación entre los parámetros y la respuesta, lo cual se logra proponiendo un modelo inicial  $\mathbf{m}^0$  que contenga los  $p$ -parámetros (3-27)

$$d_i^0 = f_i(\mathbf{m}_j^0) \quad (3-27)$$

Se asume que este modelo sufre un cambio tan pequeño que la relación pueda considerarse como lineal alrededor de  $\mathbf{m}^0$ , lo cual se expresa usando el teorema de la serie de Taylor

$$f(\mathbf{m}) = f_i(\mathbf{m}^0) + \frac{\partial f_i}{\partial m_1} \delta m_1 + \frac{\partial f_i}{\partial m_2} \delta m_2 + \frac{\partial f_i}{\partial m_3} \delta m_3 + \cdots + \frac{\partial f_i}{\partial m_p} \delta m_p + \epsilon \quad (3-28)$$

$$f(\mathbf{m}) = f(\mathbf{m}^0) + \sum_{j=1}^p \frac{\partial f_i(\mathbf{m}^0)}{\partial m_j} \delta m_j + \epsilon \quad (3-29)$$

A continuación, se procede a minimizar la diferencia entre la respuesta calculada en (3-29) y la observada

$$d - f(\mathbf{m}) = d - f(\mathbf{m}^0) - \sum_{j=1}^p \frac{\partial f_i(\mathbf{m}^0)}{\partial m_j} \delta m_j \quad (3-30)$$

Se puede linealizar la ecuación (3-30) para obtener (3-31)

$$e = y - Ax \quad (3-31)$$

donde:



$$d - f(\mathbf{m}^0) = y \quad (3-32)$$

$$\frac{\partial f_{ij}}{\partial m_j} = A \quad (3-33)$$

$$\delta m = x \quad (3-34)$$

La ecuación (3-31) es lineal similar a la ecuación (3-26) si se considera que:

$d = y$ , sea la diferencia entre los  $n$ -datos observados y los calculados.

$G = A$ , forma una matriz de tamaño  $(n \times p)$  con las derivadas parciales respecto a cada parámetro, es decir la matriz Jacobiana.

$m = x$ , sea el vector que contenga las diferencias entre los parámetros iniciales y finales.

La solución de la ecuación lineal (3-26) está dada por la estimación del vector  $\mathbf{m}$  y se puede obtener mediante cualquier técnica de álgebra lineal como eliminación gaussiana, eliminación Gauss-Jordan, descomposición LU, etc.; sin embargo, al ser un problema sobre determinado ( $n > p$ ) no es posible obtener la inversa de la matriz Jacobiana.

MEJU (1994) describe una alternativa con la cual estimar los parámetros  $\hat{\mathbf{m}}$ , de manera general, en modelos de cualquier tamaño; la solución está definida por (3-35):

$$\hat{\mathbf{m}} = [\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (3-35)$$

Una de las limitantes de este método es que se hace inestable cuando la matriz obtenida del producto  $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$  relacionada con la matriz de derivadas parciales es singular. Sin embargo, existe otra técnica más robusta para obtener la solución a partir de la Descomposición de Valores Singulares (SVD) o Descomposición Espectral. MEJU (1994) menciona que a través de esta descomposición es posible transformar un problema singular a no singular, lo cual da estabilidad al sistema; se parte de la premisa que la matriz Jacobiana  $\mathbf{G}$  es un producto de tres factores:

$$\mathbf{G}_{n \times p} = \mathbf{U}_{n \times p} \mathbf{\Lambda}_{p \times p} \mathbf{V}_{p \times p}^T \quad (3-36)$$

donde:

$\mathbf{U}_{n \times p}$  representa el espacio del modelo,

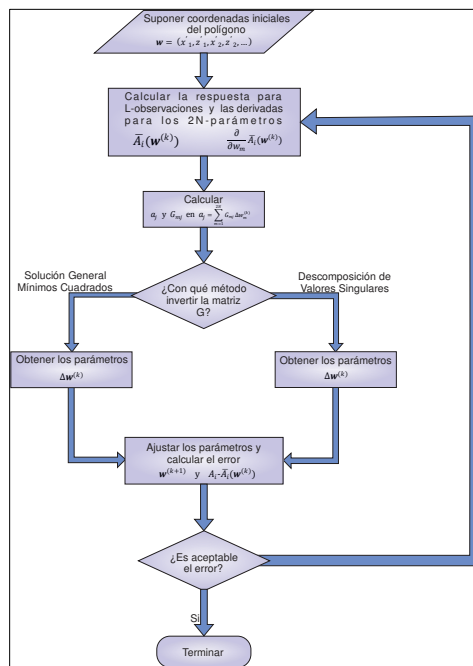
$\mathbf{V}_{p \times p}$  incluye a los eigenvectores de los parámetros,

$\mathbf{\Lambda}_{p \times p}$  es una matriz cuya diagonal contiene al menos  $j$  eigenvalores diferentes de cero que son los valores singulares de  $\mathbf{G}$ .

Los parámetros estimados quedan establecidos en la ecuación (3-37):

$$\hat{\mathbf{m}} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda}^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{d} \quad (3-37)$$

En el presente trabajo se desarrolló una rutina en Matlab que se basa en el método de gradiente conjugado (Meju, 1994), el cual es un proceso que a través de iteraciones modifica los parámetros hasta que su respuesta sea similar a los datos observados. En la *FIGURA 3.12* se muestra un diagrama de flujo de este método. Esta rutina se anexó a la interfaz de procesado para estimar los parámetros geométricos de un polígono de N-lados (*FIGURA 3.11*)



*Figura 3.12. Diagrama de flujo que muestra el proceso implementado en la interfaz de procesado para obtener el modelo de un cuerpo bidimensional de N-lados, a través de un proceso inverso.*

## 4. RESULTADOS

---

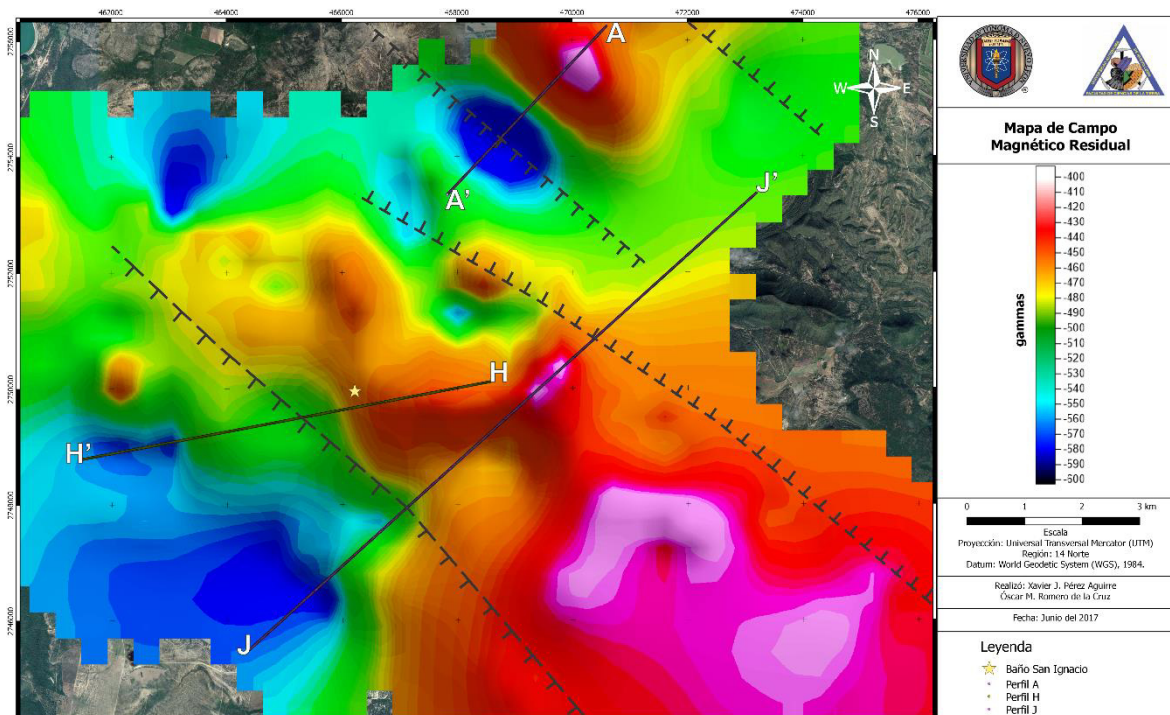
Existe software comercial para realizar el procesado y modelado de datos gravimétricos y magnéticos; sin embargo, su costo hace que sean poco accesibles. Por esta razón, la interfaz desarrollada en el presente trabajo resultó de gran utilidad para el análisis y modelado de las anomalías del área de estudio.

Para obtener la anomalía magnética residual se calculó el valor del campo magnético teórico en cada punto de observación mediante el IGRF de la *ECUACIÓN (3-3)*, la media del campo teórico obtenida a partir de 1,663 datos es 43,784.3454 gammas, con una desviación estándar de 30.6410 gammas.

El valor del campo magnético teórico de cada punto de medición fue sustraído del dato observado para obtener la anomalía que se muestra en la *FIGURA 4.1*. En ella se pueden observar los tres perfiles seleccionados para obtener algunos modelos.

La anomalía magnética residual (*FIGURA 4.1*) se presenta orientada NW-SE, donde la mayor intensidad se encuentra hacia el SE de la carta y disminuye hacia el NW. En la parte NW del mapa esta anomalía muestra características dipolares aunque irregular; en la zona anómala más intensa, al SE, no se puede determinar si es de características dipolares o monopolares, debido a que se extiende hacia el SE del área de estudio.

El Baño San Ignacio se encuentra en una zona dominada por un gradiente fuerte, al Oeste de la anomalía; el perfil H-H' cruza perpendicularmente la anomalía sobre el manantial, de igual forma, el perfil J-J' es perpendicular a la anomalía observada y cruza el gradiente que domina en el Baño San Ignacio.



*Figura 4.1. Mapa de la anomalía magnética residual del área de estudio, determinado en el presente trabajo.*

En la parte Norte del mapa de campo magnético residual, se observa una anomalía con características dipolares orientada paralela a la anomalía mayor; la parte negativa de esta anomalía se dirige al SW y la positiva al NE. Sin embargo, no pueden determinar sus características completamente, debido a que, parece extenderse hacia el norte del área de estudio.

Por otra parte, para obtener la anomalía gravimétrica se emplearon las rutinas de la interfaz desarrollada en el presente trabajo, las cuales realizan las siguientes reducciones:

- 1) Corrección por latitud
- 2) Corrección por altura
- 3) Corrección por aire-libre
- 4) Reducción a la anomalía de Bouguer simple.
- 5) Separación de la regional ajustando un plano lineal.

La corrección por latitud se calculó para punto de medición; en la corrección por altura se utilizó un promedio de la zona, debido a que no hay muchas elevaciones en la zona de estudio. Se obtuvo la anomalía de Bouguer que incluía la componente regional del campo.

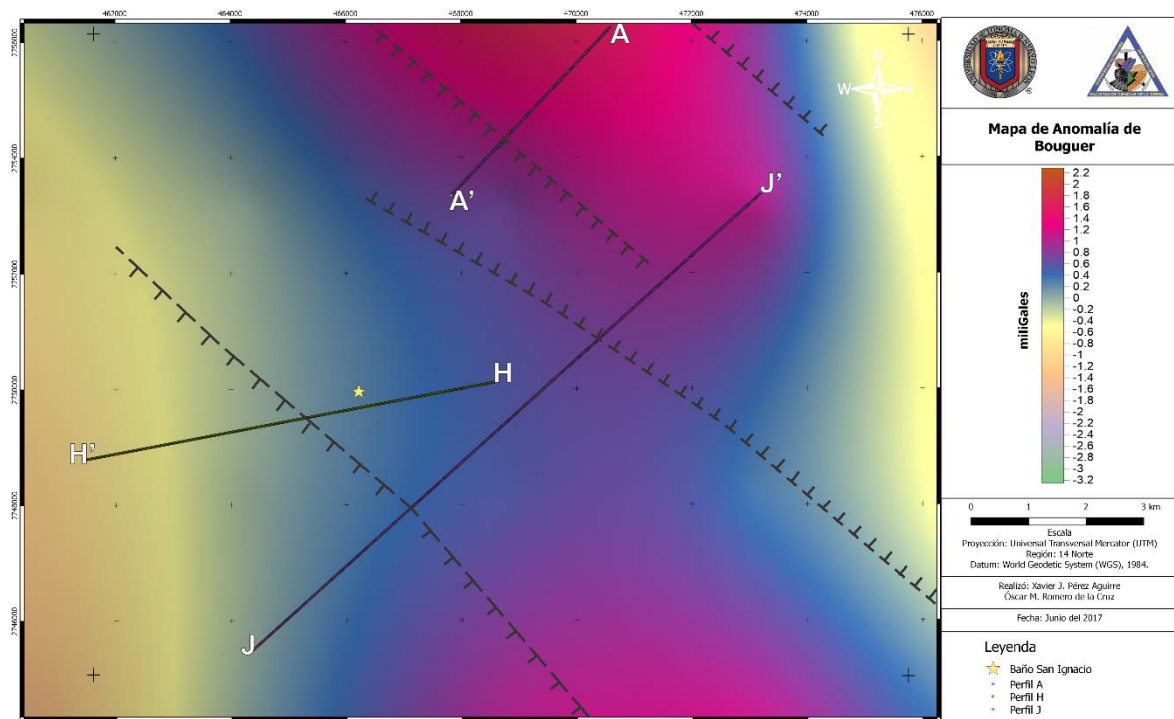
Para separar la componente regional de la anomalía local se ajustó un plano lineal resolviendo la *ECUACIÓN (3-5)*, los parámetros obtenidos son:

$$A = 133.1160; B = 43.8074; \text{ y } C = 12101.05$$

Los valores de  $A$ ,  $B$  y  $C$  generan una superficie de donde se extrae la intensidad de la componente regional para las coordenadas de cada dato

observado; el valor del plano es restado al valor observado para obtener la anomalía de Bouguer residual.

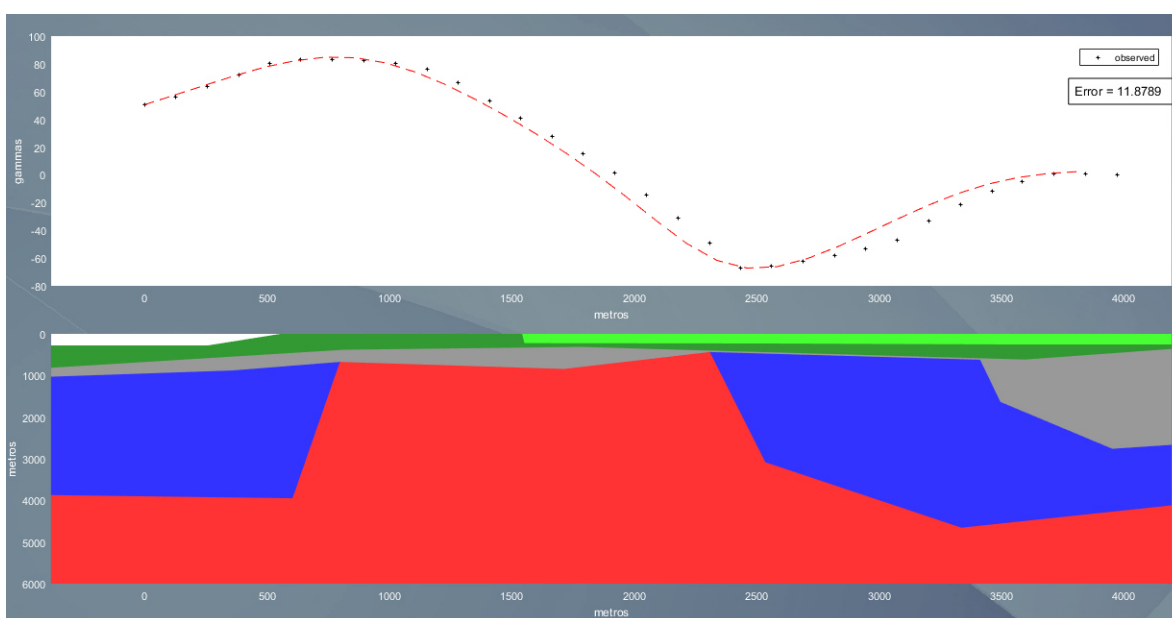
En la *FIGURA 4.2* se muestra el mapa de anomalía de Bouguer residual, en ella se aprecia una anomalía orientada N-S cuya intensidad aumenta en el centro y disminuye hacia sus bordes; de igual forma, se aprecian los perfiles A-A', H-H' y J-J'.



*Figura 4.2. Mapa de anomalía de Bouguer residual para el área del Baño San Ignacio.*

Los datos de aceleración de la gravedad que se usaron en este trabajo tienen una distribución regional por lo cual no es posible identificar pequeñas estructuras, no obstante, es factible determinar estructuras regionales.

La diferencia entre las componentes vectoriales de los campos magnético y gravitatorio, expuesta en el capítulo 3.1, influye de tal manera que la respuesta de las estructuras es distinta para ambos casos. Las líneas de fuerza del campo gravitatorio siempre están dirigidas hacia el centro de la masa, lo cual genera que la anomalía gravimétrica sea, a grandes rasgos, un reflejo de la superficie de la fuente. En ese sentido, la anomalía residual de la *FIGURA 4.2* es producida por una estructura que se eleva en la parte central.

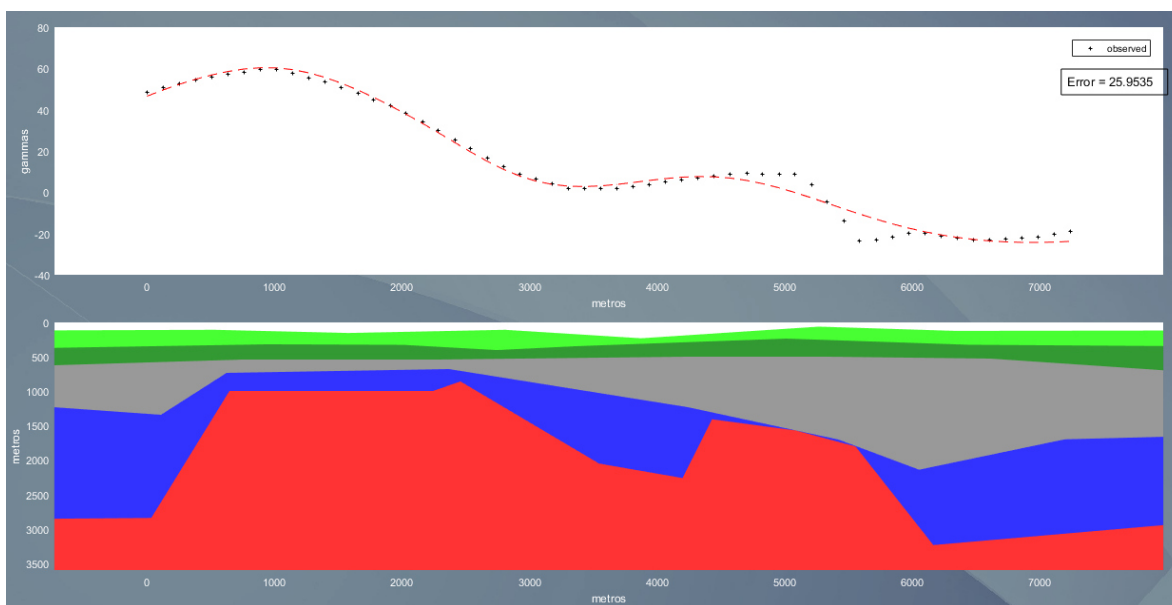


*Figura 4.3. Modelo calculado del Perfil A-A'.*

Mediante las rutinas implementadas en la interfaz se obtuvieron los modelos de los perfiles: A-A' (*FIGURA 4.3*), H-H' (*FIGURA 4.4*) y J-J' (*FIGURA 4.5*). En estos se obtuvo la distribución de las estructuras considerando cinco unidades geológicas: un basamento con susceptibilidad  $k=60$  SI; una unidad evaporítica de susceptibilidad  $k=-10$  SI; un paquete con susceptibilidad  $k=1$  SI representando a

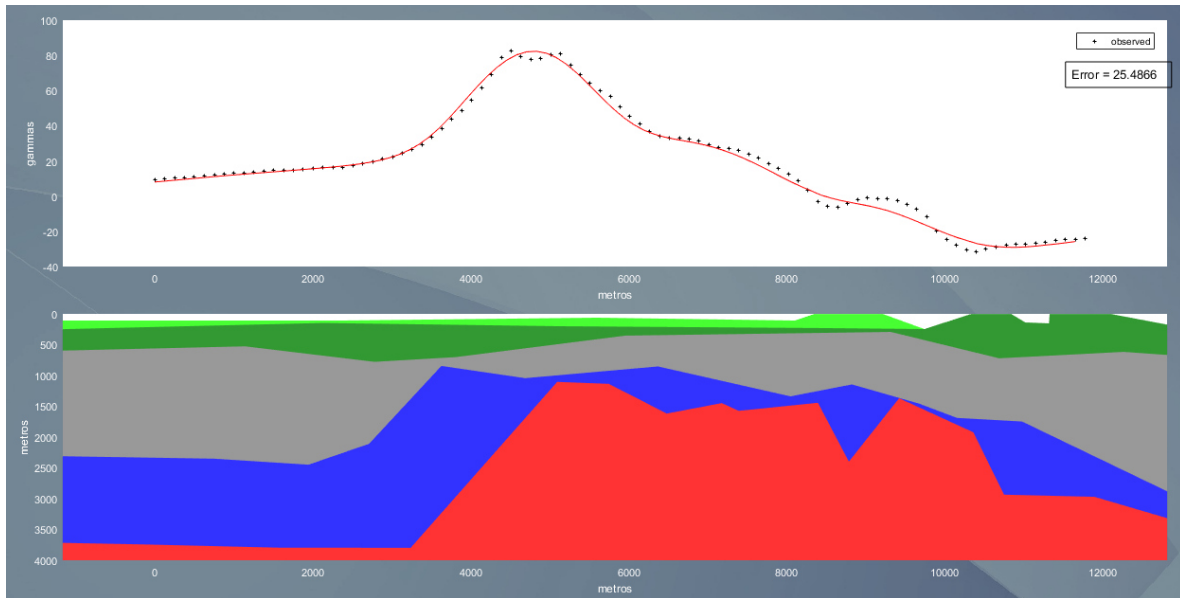


las unidades sedimentarias marinas post evaporíticas del Jurásico; la Formación San Felipe cuya susceptibilidad se determinó en  $k=0.22$  SI; y la Formación Méndez con susceptibilidad  $k=0.27$  SI.



*Figura 4.4. Modelo calculado para el perfil H-H'.*

La profundidad del basamento está en correlación con la información de los pozos Trincheras 1 y Linares 1 realizados por PEMEX. Especialmente, el pozo Trincheras 1 y la profundidad del basamento en los altos estructurales modelados poseen una mayor similitud, al igual que los espesores de las unidades.



*Figura 4.5. Modelo estimado para el perfil J-J'.*

## 5. DISCUSIÓN

---

GOLDHAMMER (1999) menciona la existencia de elevaciones en el basamento que formaban islas en el proto Golfo de México al iniciar el Jurásico. Al Oriente del Baño San Ignacio, se encontraba la paleo isla de San Carlos que subsidio sincrónicamente al desarrollo del Golfo de México.

BLOOMFIELD (1973) sugiere que el emplazamiento de los intrusivos alcalinos que conforman la Sierra de San Carlos-Crucillas tuvo un control tectónico-estructural. El fallamiento normal del basamento que se desarrolló durante la

apertura del Golfo de México, en el Jurásico-Tardío, facilitó el ascenso y emplazamiento del magma (FERRARI ET AL., 2005).

En este sentido, la elevación que se identificó en el basamento de los modelos representa un alto del paleo-relieve Jurásico donde, posteriormente, la subsidencia regional originó una cuenca restringida que depositó una secuencia evaporítica. Al desarrollarse la tectónica de margen pasivo en el Noreste de México durante el Cretácico, se depositaron las secuencias marinas de manera horizontal sobre las estructuras originalmente deformadas.

El basamento de los modelos determinados se encuentra a una profundidad máxima de 3400 metros, mientras que en los bloques elevados su profundidad varía entre 1000 y 1300 metros. Por su parte, el espesor determinado para la unidad evaporítica varía entre 50 metros sobre los altos de basamento y 1700 metros en la parte más profunda. La estructura modelada que representa las calizas cretácicas tiene un espesor máximo de 1600 metros y, en los bloques más elevados disminuye a 50 metros. El espesor de la estructura que representa la Formación San Felipe varía entre 10 a 700 metros. La estructura que representa la Formación Méndez tiene un espesor máximo de 300 metros y disminuye a pocos metros sobre los bloques elevados.

La profundidad del basamento y los espesores de las estructuras de los modelos es concordante con la información que RIBA (2010) menciona acerca de

los pozos Trincheras-1 y Linares-1. El primero se ubica a 14 kilómetros en dirección NW del Baño San Ignacio sobre un anticlinal que tiene un rumbo NW-SE, su información es la más similar a los espesores determinados sobre los altos de basamento, particularmente en los modelos correspondientes a los perfiles H-H' y J-J'. En la tabla 5.1 se comparan los datos de los modelos con los datos de los pozos.

Las hipótesis existentes para explicar el origen del hidrotermalismo del Baño San Ignacio mencionan que debajo se encuentra un cuerpo, ya sea un diapiro de sal o un intrusivo alcalino, interactuando con el agua que emerge del manantial (ANDERSON, 1984, HUBBERTEN, 1986, BARBARÍN-CASTILLO, 1988). En los modelos geofísicos determinados, así como en la información de los pozos, se confirma la existencia de una unidad evaporítica; sin embargo, su distribución no corresponde a la geometría de un diapiro, sino a un horizonte controlado por los altos estructurales de basamento.

Con respecto a la presencia de un cuerpo intrusivo alcalino debajo del Baño San Ignacio, el alto contraste de susceptibilidad magnética entre un cuerpo magmático y las litologías sedimentarias provocaría una evidente anomalía en el campo magnético, sin embargo, no se encontró alguna anomalía que respalde su existencia. Por otro lado, los intrusivos que componen la Sierra de San Carlos fueron emplazados hace 28. M.a. (Bloomfield & Cepeda-Dávila, 1973), por lo que su temperatura actual no es superior al del gradiente térmico regional.

Las propuestas existentes sobre la génesis del Baño San Ignacio sugieren la interacción del agua subterránea con un cuerpo puntual debajo del manantial, sin embargo, GARZA-CASTILLO (2004) identificó que el agua que emerge del Baño San Ignacio está enriquecida con sulfatos ( $\text{SO}_4$ ) y sodio (Na), además disminuye el contenido de cloro (Cl) en comparación con otras fuentes de agua a su alrededor; lo que sugiere que el Baño San Ignacio es alimentado por un flujo de agua regional.

TOHT (1999) desarrolló un modelo donde describe la interacción entre el agua subterránea y las unidades geológicas (Figura). De acuerdo con este modelo, se presentarán manifestaciones específicas para el flujo de agua local, intermedio y regional; las del flujo regional incluyen:

- 1) Desequilibrio en el balance de agua, las zonas de recarga serán relativamente secas que en las zonas de descarga, donde se encontrarán suelos húmedos.
- 2) Cambio de fases aniónicas del agua, reemplazando el ácido carbónico ( $\text{HCO}_3$ ) por sulfatos ( $\text{SO}_4$ ) y cloro (Cl).
- 3) En la zona de descarga se presenta un suelo salino debido al transporte de material.
- 4) Anomalías geotérmicas en la zona de descarga especialmente cuando converge el flujo en una trampa hidráulica.

De acuerdo con los resultados se puede establecer un modelo alternativo sobre el origen del Baño San Ignacio. Este inicia con la recarga de agua en la Sierra Madre Oriental, donde al descender a través de las unidades geológicas va perdiendo energía, hasta llegar a la capa impermeable de evaporitas; en este nivel el flujo se dirige hacia el Este de manera horizontal paralelo a la capa impermeable, interactúa con el medio geológico transportando material disuelto e intercambiando aniones que la enriquecen en sulfatos y cloro.

El flujo horizontal se ve interrumpido por el acuñamiento de la capa evaporítica en el borde occidental del alto de basamento, ambos elementos actúan como trampa hidráulica que modifica abruptamente la dirección del flujo hacia la superficie; durante su ascenso, el agua recupera la energía perdida en la zona de recarga intercambiando calor con el medio, consecuentemente adquiere una anomalía geotérmica positiva. Finalmente se manifiesta en superficie como: 1) un manantial con temperatura anómala y alta concentración en sólidos disueltos, especialmente  $\text{NaSO}_4$  y  $\text{CaCO}_3$ ; y 2) una zona pantanosa alrededor del manantial causada por un desequilibrio positivo entre el agua de recarga y descarga.

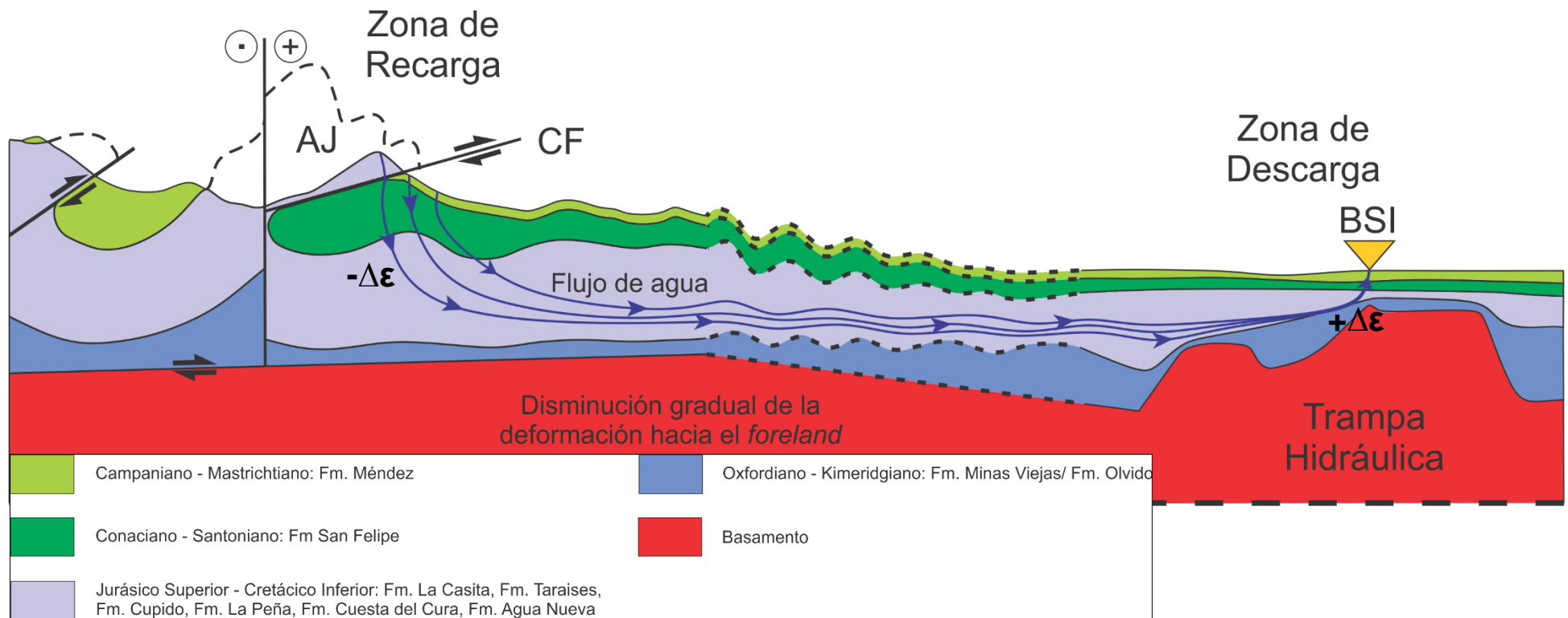


Figura 5.1. Esquema del modelo propuesto para la génesis del Baño San Ignacio. Se propone que el agua subterránea fluye desde la zona de recarga en la montaña donde al perder energía disminuye su temperatura, viaja a través del frente tectónico cuya deformación disminuye gradualmente, alcanza un alto de basamento que actúa como trampa hidráulica dirigiendo la corriente de agua regional hacia la superficie donde recupera la energía perdida en forma de calor. **AJ**=Anticlinal Jaures. **CF**=Cabalgadura frontal de la Sierra Madre Oriental. **BSI**= Baño San Ignacio.

## 6. CONCLUSIONES

---

Con las rutinas de modelado que se implementaron en la interfaz, se obtuvieron tres modelos con la distribución de las estructuras geológicas. En ellos no se encontró alguno de los cuerpos que describen independientemente ANDERSON (1984), HUBBERTEN (1986) y BARBARÍN-CASTILLO ET AL. (1988). Los espesores y profundidades de las estructuras modeladas son confirmados por núcleos de perforación extraídos en dos pozos cercanos al Baño San Ignacio.

El área de estudio está controlada por una estructura semi-regional definida como un alto de basamento, sobre el que se depositaron las secuencias marinas del Jurásico Superior-Cretácico Superior. Los altos de basamento modelados muestran una correlación en los espesores de sus unidades con el pozo Trincheras-1, lo cual sugiere que el alto estructural del basamento tiene una orientación NW-SE.

A su vez, esta estructura puede actuar como trampa hidráulica para el flujo de agua subterránea que proviene de la Sierra Madre Oriental, controlando el sistema del Baño San Ignacio.



## 7. REFERENCIAS

- 
- Agocs, W. S. (1951). Least Squares Residual Anomaly Determination. *Geophysics*, 16(1), 919-1025.
- Aiken, C., Bide, M., Xu, X., Abdel-Salam, M., De la Fuente, M., & Mena, M. (1997). Integrated Studies of México with Gravity, Magnetic, and GIS database. *The Leading Edge*, 1-7.
- Anderson, B. (1984). El manantial hidrotermal Baño de San Ignacio en Linares, N.L., México. *Reporte Técnico de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL*, 19.
- Aster, R., Borchers, B., & Thurber, C. (2013). *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Elsevier.
- Barbarín-Castillo, J., Hubberten, H. W., Meiburg, P., & Rodríguez, C. (1988). Hidrogeoquímica de las aguas termales del Baño San Ignacio, Linares, Nuevo León, México. *Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL*, 3, 1-99.
- Blakely, R. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. England: Cambridge University Press.
- Bloomfield, K., & Cepeda-Dávila, L. (1973). Oligocene Alkaline Igneous Activity in NE Mexico. *Geology Magazine*, 110(VI), 551-555.
- Chávez-Cabello, G., Torres, J., Porras, N. D., Cossio, T., & Aranda, J. J. (2011). Evolución estructural del frente tectónico de la Sierra Madre Oriental en el Cañón de Santa Rosa, Linares, Nuevo León. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(2), 253-270.

- Dentith, M., & Mudge, S. (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- Eguiluz de Antuño, S. E. (1989). La Formación Carbonera y sus Implicaciones Tectónicas, Estados de Coahuila y Nuevo León. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 50(1), 3-39.
- Ferrari, L., Tagami, T., Eguchi, M., Orozco-Esquivel, M., Petrone, C., Jacob-Albarrán, J., & López-Martínez, M. (2005). Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the southwestern Gulf of Mexico: The Eastern Alkaline Province revisited. *Journal of Volcanology and Geothermics Research*, 146(1), 284-306.
- Gallardo-Delgado, L., Pérez-Flores, M., & Gómez-Treviño, E. (2003). A Versatile Algorithm for Joint 3D Inversion of Gravity and Magnetic Data. *Geophysics*, 68(3), 949-959.
- Garza Castillo, A. M. (2006). Estudio Hidrogeoquímico de Aguas Subterráneas en el Área del Baño San Ignacio, NE de México. *Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL.*, 96. Linares, Nuevo León, México.
- Goldammer, R. K. (1999). Mesozoic Sequence Stratigraphy and Paleogeographic Evolution of Northeast Mexico. *Geological Society of America, Special Paper 340*, 1-58.
- Henry, C., Price, J., & James, E. (1991). Cenozoic Stress Evolution and Magmatism in the Southern Cordillera, Texas and Mexico: Transition from Continental Arc to Intraplate Extension. *Journal of Geophysical Research*, 96(B8), 13,545-13,560.

- Hinze, W., Von Frese, R., & Sadd, A. (2013). *Gravity and Magnetic Exploration. Principles, Practices, and Applications*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Hubberten, H. W. (1986). The sierra de San Carlos, Tamaulipas -An Igneous Complex of the Eastern Mexican Alkaline Province. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, 1183-1191.
- Hunter-Huston, H., Greeme, E., & Aiken, C. (1998). An Integrated 3-D Gravity and Seismic Study of the Ouachita Frontal Thrust Belt, Pittsburg and Latimer Counties, Oklahoma. . En Gibson.. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists.
- Hurtado Vázquez, J. I. (1992). Estudio de la relación entre la anomalía geotérmica "Baño San Ignacio" y el fracturamiento regional mediante mediciones electromagnéticas de conductividad, Linares, Nuevo León. *Tesis de Licenciatura FCT, UANL*. Linares, Nuevo León.
- INEGI. (30 de Enero de 2016). *Modelos y Cartas Gravimétricas*. Obtenido de [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/modelos\\_cartas.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/modelos_cartas.aspx)
- International Association of Geomagnetism and Aeronomy-Division of Geomagnetic Field Modelling. (3 de Septiembre de 2016). *12° Generation IGRF*. Obtenido de <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/>
- Jacoby, W., & Smilde, P. (2009). *Gravity Interpretation. Fundamentals and application of gravity inversion and geological interpretation*. Mainz, Alemania: Springer.

- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An introduction to exploration geophysical*. Oxford, Gran Bretaña: Blackwell Science.
- Kellum, L., Watson, E., Bastin, E., Imlay, L., Dice, R., Chickering, R., . . . Gaige, H. (1938). The Geology and Biology of the Sierra de San Carlos Mountains, Tamaulipas, Mexico. *The Journal of Geology*, 46(6), 894-896.
- Kumar Roy, K. (2008). *Potential Theory in Applied Geophysics*. Berlon, Alemania: Springer.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Edimburg., Inglaterra: Cambridge University Press.
- Meju, M. (1994). *Geophysical Data Analysis: Understanding the Inverse Problem. Theory and Practice*. Tulsa, Ok.: Society of Exploration Geophysicists.
- Menke, W. (2012). *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory, MATLAB edition*. Walhtam, Ma. EUA: Elsevier.
- Meyer, J., Racic, L., & Saltus, R. (1998). The Compilation and Application of Aeromagnetic Data for Hydrocarbon Exploration in Interior Alaska. En R. Gibson, *Geologic Applications of Gravity and Magnetism: Case Histories* (págs. 1-162). Tulsa, OK., USA: Society of Exploration Geophysicists.
- Padilla y Sánchez, R. J. (2007). Evolución Geológica del Sureste Mexicano desde el Mesozoico al Presente en el Contexto Regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 19-42.
- Prieto, C. (1998). Gulf of Mexico Continental Slope -Understanding the Magnetic Response Due to the Salt Intrusion. En R. Gibson, & P. Millegan, *Geology*

*Applications of Gravity and Magnetic: Case Histories* (pág. 162). Tulsa, OK, USA.: Society of Exploration Geophysicists.

Riba Ramirez, A. (2010). Propuesta de Modelo Geológico Para la Parte Oriental de la Isla de San Carlos, Estado de Tamaulipas. *Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de México.*, 49. México, D.F.

Rodríguez García, M. G. (1992). Invertigaciones eléctricas sobre estructuras y régimen hidráulico de la anomalía térmica Baño San Ignacio. *Tesis de Licenciatura Facultas de Ciencias de la Tierra, UANL.* Linares, Nuevo León.

Rodríguez Palacios, F. (1993). Mapeo geológico e investigaciones de la estructura tectónica en la región del Baño San Ignacio, al Este de la ciudad de Linares, N.L., México. *Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL.* Linares, Nuevo León, México.

Servicio Geológico Mexicano. (20 de Enero de 2017). *Léxico Estratigráfico de México.* Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: [http://www.sgm.gob.mx/Lexico\\_Es/](http://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/)

Talwani, M., Worzel, L., & Landisman, M. (1959). Rapid gravity computations for two-dimensional bodies whit application to the Mendocino Submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research*, 64(1), 49-59.

Toht, J. (1999). Groundwater as Geologic Agent: An Overview of the Causes, Processes, and Manifestations. *Hydrogeology Journal*, 7(1), 1-14.

Torres, R., Ruiz, P., Patchett, J., & Grajales, M. (1999). Permo-Triassic Continental Arc in Eastern Mexico: Tectonic Implications for Reconstructios of Southern North America. *Geological Society of America, Special Paper 340*, 1-7.

Won, I., & Bevis, M. (1987). Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines. *Geophysics*, 52(2), 232-238.

## 8. ANEXOS

---

### ANEXO I. RUTINA PARA CALCULAR EL CAMPO GEOMAGNÉTICO DE REFERENCIA INTERNACIONAL (IGRF) ADAPTADO DE IAGA (2012)

```
WRITE(6,*)
WRITE(6,*)'Enter name of output file (30 characters maximum)'
WRITE(6,*)'or press "Return" for output to screen'
READ (5,991) FNM
991 FORMAT (A30)
IF (ICHAR(FNM(1:1)).EQ.32) THEN
  IU = 6
ELSE
  IU = 2
OPEN (UNIT = IU,FILE = FNM,STATUS = 'NEW')
END IF
FACT = 180.0/3.141592654
NCOUNT = 0
C
10 WRITE(6,*)'Enter value for coordinate system:'
  WRITE(6,*)
  1'1 - geodetic (shape of Earth is approximated by a spheroid)'
  WRITE(6,*)
  1'2 - geocentric (shape of Earth is approximated by a sphere)'
  READ (5,*) ITYPE
  IF (ITYPE.LT.1.OR.ITYPE.GT.2) GO TO 10
  IF (ITYPE.EQ.1) TYPE = ' geodetic '
  IF (ITYPE.EQ.2) TYPE = ' geocentric'
C
20 WRITE(6,*) 'Choose an option:'
  WRITE(6,*) '1 - values at one or more locations & dates'
  WRITE(6,*) '2 - values at yearly intervals at one location'
  WRITE(6,*) '3 - values on a latitude/longitude grid at one date'
  READ (5,*) IOPT
  IF(IOPT.LT.1.OR.IOPT.GT.3) GO TO 20
  IF (IOPT.EQ.3) GO TO 150
C
30 WRITE(6,*)'Enter value for format of latitudes and longitudes:'
  WRITE(6,*)'1 - in degrees & minutes'
  WRITE(6,*)'2 - in decimal degrees'
  READ (5,*) IDM
```

```

    IF (IDM.LT.1.OR.IDM.GT.2) GO TO 30
    IF (NCOUNT.EQ.0) GOTO 50
C
40 WRITE(6,*)
  1'Do you want values for another date & position? (y/n)'
  READ (5,'(A1)') IA
  IF (IA.NE.'Y'.AND.IA.NE.'y'.AND.IA.NE.'N'.AND.IA.NE.'n')
  1  GO TO 40
  IF(IA.EQ.'N'.OR.IA.EQ.'n') THEN
    WRITE(IU,928)
928 FORMAT (' D is declination (+ve east)'/
  1      ' I is inclination (+ve down)'/
  2      ' H is horizontal intensity'/
  3      ' X is north component'/
  4      ' Y is east component'/
  5      ' Z is vertical component (+ve down)'/
  6      ' F is total intensity')
    WRITE(IU,929)
929 FORMAT ('/' SV is secular variation (annual rate of change)')
    IF (ITYPE.EQ.2) THEN
      WRITE(IU,*)
      1'These elements are relative to the geocentric coordinate system'
      ELSE
        WRITE(IU,*)
      ENDIF
      STOP
    ENDIF
C
50 NCOUNT = 1
  IF (IOPT.NE.2) THEN
    WRITE(6,*) 'Enter date in years A.D.'
    READ (5,*) DATE
    IF (DATE.LT.DTMN.OR.DATE.GT.DTMX) GO TO 209
    ENDIF

    IF(ITYPE.EQ.1) THEN
      WRITE(6,*) 'Enter altitude in km'
    ELSE
      WRITE(6,*) 'Enter radial distance in km (>3485 km)'
    END IF
    READ (5,*) ALT
    IF (ITYPE.EQ.2.AND.ALT.LE.3485.0) GO TO 210
C
  IF (IDM.EQ.1) THEN
    WRITE(6,*) 'Enter latitude & longitude in degrees & minutes'
    WRITE(6,*) '(if either latitude or longitude is between -1'
    WRITE(6,*) 'and 0 degrees, enter the minutes as negative).'
    WRITE(6,*) 'Enter 4 integers'

```



```

READ (5,*) LTD,LTM,LND,LNM
IF (LTD.LT.-90.OR.LTD.GT.90.OR.LTM.LE.-60.OR.LTM.GE.60) GO TO 204
IF (LND.LT.-360.OR.LND.GT.360.OR.LNM.LE.-60.OR.LNM.GE.60)
1 GO TO 205
IF (LTM.LT.0.AND.LTD.NE.0) GO TO 204
IF (LNM.LT.0.AND.LND.NE.0) GO TO 205
CALL DMDDEC (LTD,LTM,XLT)
CALL DMDDEC (LND,LNM,XLN)
ELSE
WRITE(6,*) 'Enter latitude & longitude in decimal degrees'
READ (5,*) XLT,XLN
IF (XLT.LT.-90.0.OR.XLT.GT.90.0) GO TO 202
IF (XLN.LT.-360.0.OR.XLN.GT.360.0) GO TO 203
ENDIF
C
WRITE(*,*) 'Enter place name (20 characters maximum)'
READ (*,'(A)') NAME
CLT = 90.0 - XLT
IF (CLT.LT.0.0.OR.CLT.GT.180.0) GO TO 204
IF (XLN.LE.-360.0.OR.XLN.GE.360.0) GO TO 205
IF (IOPT.EQ.2) GOTO 60
C
CALL IGRF12SYN (0,DATE,ITYPE,ALT,CLT,XLN,X,Y,Z,F)
D = FACT*ATAN2(Y,X)
H = SQRT(X*X + Y*Y)
S = FACT*ATAN2(Z,H)
CALL DDECDM (D,IDEC,IDECM)
CALL DDECDM (S,INC,INCM)
C
CALL IGRF12SYN (1,DATE,ITYPE,ALT,CLT,XLN,DX,DY,DZ,F1)
DD = (60.0*FACT*(X*DY - Y*DX))/(H*H)
DH = (X*DX + Y*DY)/H
DS = (60.0*FACT*(H*DZ - Z*DH))/(F*F)
DF = (H*DH + Z*DZ)/F
C
IF (IDM.EQ.1) THEN
WRITE(IU,930) DATE,LTD,LTM,TYPE,LND,LNM,ALT,NAME
930 FORMAT (1X,F8.3,' Lat',2I4,A11,' Long ',2I4,F10.3,' km ',A20)
ELSE
WRITE(IU,931) DATE,XLT,TYPE,XLN,ALT,NAME
931 FORMAT (1X,F8.3,' Lat',F8.3,A11,' Long ',F8.3,F10.3,' km ',A20)
ENDIF
C
IDD = NINT(DD)
WRITE(IU,937) IDEC,IDECM,IDD
937 FORMAT (15X,'D =',I5,' deg',I4,' min',4X,'SV =',I8,' min/yr')
C
IDS = NINT(DS)

```

```

        WRITE(IU,939) INC,INCM,IDS
939 FORMAT (15X,'I =',I5,' deg',I4,' min',4X,'SV =',I8,' min/yr')
C
    IH = NINT(H)
    IDH = NINT(DH)
    WRITE(IU,941) IH,IDH
941 FORMAT (15X,'H =',I8,' nT    ',5X,'SV =',I8,' nT/yr')
C
    IX = NINT(X)
    IDX = NINT(DX)
    WRITE(IU,943) IX,IDX
943 FORMAT (15X,'X =',I8,' nT    ',5X,'SV =',I8,' nT/yr')
C
    IY = NINT(Y)
    IDY = NINT(DY)
    WRITE(IU,945) IY,IDY
945 FORMAT (15X,'Y =',I8,' nT    ',5X,'SV =',I8,' nT/yr')
C
    IZ = NINT(Z)
    IDZ = NINT(DZ)
    WRITE(IU,947) IZ,IDZ
947 FORMAT (15X,'Z =',I8,' nT    ',5X,'SV =',I8,' nT/yr')
C
    NF = NINT(F)
    IDF = NINT(DF)
    WRITE(IU,949) NF,IDF
949 FORMAT (15X,'F =',I8,' nT    ',5X,'SV =',I8,' nT/yr')
C
    GO TO 40
C
60 CONTINUE
C
C  SERIES OF VALUES AT ONE LOCATION...
C
    IF (IDM.EQ.1) THEN
        WRITE(IU,932) LTD,LTM,TYPE,LND,LNM,ALT,NAME
932 FORMAT ('Lat',2I4,A11,' Long ',2I4,F10.3,' km ',A20)
        ELSE
            WRITE(IU,933) XLT,TYPE,XLN,ALT,NAME
933 FORMAT ('Lat',F8.3,A11,' Long ',F8.3,F10.3,' km ',A20)
        ENDIF
        WRITE (IU,934)
934 FORMAT (3X,'DATE',7X,'D',3X,'SV',6X,'I',2X,'SV',6X,'H',4X,'SV',
17X,'X',4X,'SV',7X,'Y',4X,'SV',7X,'Z',4X,'SV',6X,'F',4X,'SV')
        IMX = DTMX - DTMN - 5
        DO 70 I = 1,IMX
            DATE = DTMN - 0.5 + I
            CALL IGRF12SYN (0,DATE,ITYPE,ALT,CLT,XLN,X,Y,Z,F)

```

```

D = FACT*ATAN2(Y,X)
H = SQRT(X*X + Y*Y)
S = FACT*ATAN2(Z,H)
IH = NINT(H)
IX = NINT(X)
IY = NINT(Y)
IZ = NINT(Z)
NF = NINT(F)
C
CALL IGRF12SYN (1,DATE,ITYPE,ALT,CLT,XLN,DX,DY,DZ,F1)
DD = (60.0*FACT*(X*DY - Y*DX))/(H*H)
DH = (X*DX + Y*DY)/H
DS = (60.0*FACT*(H*DZ - Z*DH))/(F*F)
DF = (H*DH + Z*DZ)/F
IDD = NINT(DD)
IDH = NINT(DH)
IDS = NINT(DS)
IDX = NINT(DX)
IDY = NINT(DY)
IDZ = NINT(DZ)
IDF = NINT(DF)
C
WRITE(IU,935)
1  DATE,D,IDD,S,IDS,IH,IDH,IX,IDX,IY,IDY,IZ,IDZ,NF,IDF
935 FORMAT(1X,F6.1,F8.2,I5,F7.2,I4,I7,I6,3(I8,I6),I7,I6)
70 CONTINUE
IFL = 2
GOTO 158
C
C  GRID OF VALUES...
C
150 WRITE(6,*)'Enter value for MF/SV flag:'
WRITE(6,*)'0 for main field (MF)'
WRITE(6,*)'1 for secular variation (SV)'
WRITE(6,*)'2 for both'
WRITE(6,*)'9 to quit'
READ (5,*) IFL
IF (IFL.EQ.9) STOP
IF (IFL.NE.0.AND.IFL.NE.1.AND.IFL.NE.2) GOTO 150
C
WRITE(6,*) 'Enter initial value, final value & increment or'
WRITE(6,*) 'decrement of latitude, in degrees & decimals'
READ (5,*) XLTI,XLTF,XLTD
LTI = NINT(1000.0*XLTI)
LTF = NINT(1000.0*XLTF)
LTD = NINT(1000.0*XLTD)
WRITE(6,*) 'Enter initial value, final value & increment or'
WRITE(6,*) 'decrement of longitude, in degrees & decimals'

```

```

READ (5,*) XLNI,XLNF,XLND
LNI = NINT(1000.0*XLNI)
LNF = NINT(1000.0*XLNF)
LND = NINT(1000.0*XLND)
IF (LTI.LT.-90000.OR.LTI.GT.90000) GO TO 206
IF (LTF.LT.-90000.OR.LTF.GT.90000) GO TO 206
IF (LNI.LT.-360000.OR.LNI.GT.360000) GO TO 207
IF (LNF.LT.-360000.OR.LNF.GT.360000) GO TO 207
98 WRITE(6,*) 'Enter date in years A.D.'
READ (5,*) DATE
IF (DATE.LT.DTMN.OR.DATE.GT.DTMX) GO TO 209
IF (ITYPE.EQ.1) THEN
  WRITE(6,*) 'Enter altitude in km'
ELSE
  WRITE(6,*) 'Enter radial distance in km (>3485 km)'
END IF
READ (5,*) ALT
IF (ITYPE.EQ.2.AND.ALT.LE.3485.0) GO TO 210
WRITE(IU,958) DATE,ALT,TYPE
958 FORMAT (' Date =',F9.3,5X,'Altitude =',F10.3,' km',5X,A11//
1   '   Lat   Long',7X,'D',7X,'I',7X,'H',7X,'X',7X,'Y',
2   7X,'Z',7X,'F')
C
  LT = LTI
151 XLT = LT
  XLT = 0.001*XLT
  CLT = 90.0 - XLT
  IF (CLT.LT.-0.001.OR.CLT.GT.180.001) GO TO 202
  LN = LNI
152 XLN = LN
  XLN = 0.001*XLN
  IF (XLN.LE.-360.0) XLN = XLN + 360.0
  IF (XLN.GE.360.0) XLN = XLN - 360.0
  CALL IGRF12SYN (0,DATE,ITYPE,ALT,CLT,XLN,X,Y,Z,F)
  D = FACT*ATAN2(Y,X)
  H = SQRT(X*X + Y*Y)
  S = FACT*ATAN2(Z,H)
  IH = NINT(H)
  IX = NINT(X)
  IY = NINT(Y)
  IZ = NINT(Z)
  NF = NINT(F)
  IF (IFL.EQ.0) GOTO 153
  CALL IGRF12SYN (1,DATE,ITYPE,ALT,CLT,XLN,DX,DY,DZ,F1)
  IDX = NINT(DX)
  IDY = NINT(DY)
  IDZ = NINT(DZ)
  DD = (60.0*FACT*(X*DY - Y*DX))/(H*H)

```

```

    IDD = NINT(DD)
    DH = (X*DX + Y*DY)/H
    IDH = NINT(DH)
    DS = (60.0*FACT*(H*DZ - Z*DH))/(F*F)
    IDS = NINT(DS)
    DF = (H*DH + Z*DZ)/F
    IDF = NINT(DF)
C
153 CONTINUE
    IF (IFL.EQ.0) WRITE(IU,959) XLT,XLN,D,S,IH,IX,IY,IZ,NF
    IF (IFL.EQ.1) WRITE(IU,960) XLT,XLN,IDD,IDS,IDH,IDX,IDY,IDZ,IDF
    IF (IFL.EQ.2) THEN
        WRITE(IU,959) XLT,XLN,D,S,IH,IX,IY,IZ,NF
        WRITE(IU,961) IDD,IDS,IDH,IDX,IDY,IDZ,IDF
    ENDIF
959 FORMAT (2F9.3,2F8.2,5I8)
960 FORMAT (2F9.3,7I8)
961 FORMAT (14X,'SV: ',7I8)
C
154 LN = LN + LND
    IF (LND.LT.0) GO TO 156
    IF (LN.LE.LNF) GO TO 152
155 LT = LT + LTD
    IF (LTD.LT.0) GO TO 157
    IF (LT - LTF) 151,151,158
156 IF (LN - LNF) 155,152,152
157 IF (LT.GE.LTF) GO TO 151
158 CONTINUE
    IF (IFL.EQ.0.OR.IFL.EQ.2) THEN
        WRITE(IU,962)
962 FORMAT (' D is declination in degrees (+ve east)'/
1      ' I is inclination in degrees (+ve down)'/
2      ' H is horizontal intensity in nT'/
3      ' X is north component in nT'/
4      ' Y is east component in nT'/
5      ' Z is vertical component in nT (+ve down)'/
6      ' F is total intensity in nT')
    IF (IFL.NE.0) WRITE(IU,963)
963 FORMAT (' SV is secular variation (annual rate of change)'/
1' Units for SV: minutes/yr (D & I); nT/yr (H,X,Y,Z & F)')
    IF (ITYPE.EQ.2) WRITE(IU,*)
1'These elements are relative to the geocentric coordinate system'
    ELSE
        WRITE(IU,964)
964 FORMAT (' D is SV in declination in minutes/yr (+ve east)'/
1      ' I is SV in inclination in minutes/yr (+ve down)'/
2      ' H is SV in horizontal intensity in nT/yr'/
3      ' X is SV in north component in nT/yr'/

```

```

4      ' Y is SV in east component in nT/yr'/
5      ' Z is SV in vertical component in nT/yr (+ve down)'/
6      ' F is SV in total intensity in nT/yr')
      IF (ITYPE.EQ.2) WRITE(IU,*)
      1'These elements are relative to the geocentric coordinate system'
      ENDIF
159 STOP
C
209 WRITE(6,972) DATE
972 FORMAT (' ***** Error *****/' DATE =',F9.3,
1      ' - out of range')
      STOP
C
210 WRITE(6,973) ALT,ITYPE
973 FORMAT (' ***** Error *****/' A value of ALT =',F10.3,
1      ' is not allowed when ITYPE =',I2)
      STOP
C
202 WRITE(6,966) XLT
966 FORMAT (' ***** Error *****/' XLT =',F9.3,
1      ' - out of range')
      STOP
C
203 WRITE(6,967) XLN
967 FORMAT (' ***** Error *****/' XLN =',F10.3,
1      ' - out of range')
      STOP
C
204 WRITE(6,968) LTD,LTM
968 FORMAT (' ***** Error *****/' Latitude out of range',
1      ' - LTD =',I6,5X,'LTM =',I4)
      STOP
C
205 WRITE(6,969) LND,LNM
969 FORMAT (' ***** Error *****/' Longitude out of range',
1      ' - LND =',I8,5X,'LNM =',I4)
      STOP
C
206 WRITE(6,970) LTI,LTF
970 FORMAT (' ***** Error *****/'
1      ' Latitude limits of table out of range - LTI =',
2      I6,5X,' LTF =',I6)
      STOP
C
207 WRITE(6,971) LNI,LNF
971 FORMAT (' ***** Error *****/'
1      ' Longitude limits of table out of range - LNI =',
2      I8,5X,' LNF =',I8)

```

```

      STOP
C
      END
C
      SUBROUTINE DMDDEC (I,M,X)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DE = I
      EM = M
      IF (I.LT.0) EM = -EM
      X = DE + EM/60.0
      RETURN
      END
C
      SUBROUTINE DDECMD (X,I,M)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      SIG = SIGN(1.1D0,X)
      DR = ABS(X)
      I = INT(DR)
      T = I
      M = NINT(60.*(DR - T))
      IF (M.EQ.60) THEN
        M = 0
        I = I + 1
      ENDIF
      ISIG = INT(SIG)
      IF (I.NE.0) THEN
        I = I * ISIG
      ELSE
        IF (M.NE.0) M = M * ISIG
      ENDIF
      RETURN
      END

      subroutine igrf12syn
      (isv,date,itype,alt,colat,elong,x,y,z,f)
      implicit double precision (a-h,o-z)
      dimension gh(3451),g0(120),g1(120),g2(120),g3(120),g4(120),
1      g5(120),g6(120),g7(120),g8(120),g9(120),ga(120),
2      gb(120),gc(120),gd(120),ge(120),gf(120),gg(120),
3      gi(120),gj(120),gk(195),gl(195),gm(195),gp(195),
4      gq(195),gr(195),
5      p(105),q(105),cl(13),sl(13)
      equivalence (g0,gh(1)),(g1,gh(121)),(g2,gh(241)),(g3,gh(361)),
1      (g4,gh(481)),(g5,gh(601)),(g6,gh(721)),(g7,gh(841)),
2      (g8,gh(961)),(g9,gh(1081)),(ga,gh(1201)),
3      (gb,gh(1321)),(gc,gh(1441)),(gd,gh(1561)),
4      (ge,gh(1681)),(gf,gh(1801)),(gg,gh(1921)),
5      (gi,gh(2041)),(gj,gh(2161)),(gk,gh(2281)),

```

```

6      (gl,gh(2476)),(gm,gh(2671)),(gp,gh(2866)),
7      (gq,gh(3061)),(gr,gh(3256))

```

c

```

implicit double precision (a-h,o-z)
dimension gh(3451),g0(120),g1(120),g2(120),g3(120),g4(120),
1      g5(120),g6(120),g7(120),g8(120),g9(120),ga(120),
2      gb(120),gc(120),gd(120),ge(120),gf(120),gg(120),
3      gi(120),gj(120),gk(195),gl(195),gm(195),gp(195),
4      gq(195),gr(195),
5      p(105),q(105),cl(13),sl(13)
equivalence (g0,gh(1)),(g1,gh(121)),(g2,gh(241)),(g3,gh(361)),
1      (g4,gh(481)),(g5,gh(601)),(g6,gh(721)),(g7,gh(841)),
2      (g8,gh(961)),(g9,gh(1081)),(ga,gh(1201)),
3      (gb,gh(1321)),(gc,gh(1441)),(gd,gh(1561)),
4      (ge,gh(1681)),(gf,gh(1801)),(gg,gh(1921)),
5      (gi,gh(2041)),(gj,gh(2161)),(gk,gh(2281)),
6      (gl,gh(2476)),(gm,gh(2671)),(gp,gh(2866)),
7      (gq,gh(3061)),(gr,gh(3256))

```

c

```

data g0/ -31543.,-2298., 5922., -677., 2905.,-1061., 924., 1121., 1900
1      1022.,-1469., -330., 1256., 3., 572., 523., 876., 1900
2      628., 195., 660., -69., -361., -210., 134., -75., 1900
3      -184., 328., -210., 264., 53., 5., -33., -86., 1900
4      -124., -16., 3., 63., 61., -9., -11., 83., 1900
5      -217., 2., -58., -35., 59., 36., -90., -69., 1900
6      70., -55., -45., 0., -13., 34., -10., -41., 1900
7      -1., -21., 28., 18., -12., 6., -22., 11., 1900
8      8., 8., -4., -14., -9., 7., 1., -13., 1900
9      2., 5., -9., 16., 5., -5., 8., -18., 1900
a      8., 10., -20., 1., 14., -11., 5., 12., 1900
b      -3., 1., -2., -2., 8., 2., 10., -1., 1900
c      -2., -1., 2., -3., -4., 2., 2., 1., 1900
d      -5., 2., -2., 6., 6., -4., 4., 0., 1900
e      0., -2., 2., 4., 2., 0., 0., -6./ 1900
data g1/ -31464.,-2298., 5909., -728., 2928.,-1086., 1041., 1065., 1905
1      1037.,-1494., -357., 1239., 34., 635., 480., 880., 1905
2      643., 203., 653., -77., -380., -201., 146., -65., 1905
3      -192., 328., -193., 259., 56., -1., -32., -93., 1905
4      -125., -26., 11., 62., 60., -7., -11., 86., 1905
5      -221., 4., -57., -32., 57., 32., -92., -67., 1905
6      70., -54., -46., 0., -14., 33., -11., -41., 1905
7      0., -20., 28., 18., -12., 6., -22., 11., 1905
8      8., 8., -4., -15., -9., 7., 1., -13., 1905
9      2., 5., -8., 16., 5., -5., 8., -18., 1905
a      8., 10., -20., 1., 14., -11., 5., 12., 1905
b      -3., 1., -2., -2., 8., 2., 10., 0., 1905
c      -2., -1., 2., -3., -4., 2., 2., 1., 1905
d      -5., 2., -2., 6., 6., -4., 4., 0., 1905

```



e 0., -2., 2., 4., 2., 0., 0., -6./ 1905  
data g2/ -31354.,-2297., 5898., -769., 2948.,-1128., 1176., 1000., 1910  
1 1058.,-1524., -389., 1223., 62., 705., 425., 884., 1910  
2 660., 211., 644., -90.,-400.,-189., 160., -55., 1910  
3 -201., 327., -172., 253., 57., -9., -33., -102., 1910  
4 -126., -38., 21., 62., 58., -5., -11., 89., 1910  
5 -224., 5., -54., -29., 54., 28., -95., -65., 1910  
6 71., -54., -47., 1., -14., 32., -12., -40., 1910  
7 1., -19., 28., 18., -13., 6., -22., 11., 1910  
8 8., 8., -4., -15., -9., 6., 1., -13., 1910  
9 2., 5., -8., 16., 5., -5., 8., -18., 1910  
a 8., 10., -20., 1., 14., -11., 5., 12., 1910  
b -3., 1., -2., -2., 8., 2., 10., 0., 1910  
c -2., -1., 2., -3., -4., 2., 2., 1., 1910  
d -5., 2., -2., 6., 6., -4., 4., 0., 1910  
e 0., -2., 2., 4., 2., 0., 0., -6./ 1910  
data g3/ -31212.,-2306., 5875., -802., 2956.,-1191., 1309., 917., 1915  
1 1084.,-1559., -421., 1212., 84., 778., 360., 887., 1915  
2 678., 218., 631., -109., -416., -173., 178., -51., 1915  
3 -211., 327., -148., 245., 58., -16., -34., -111., 1915  
4 -126., -51., 32., 61., 57., -2., -10., 93., 1915  
5 -228., 8., -51., -26., 49., 23., -98., -62., 1915  
6 72., -54., -48., 2., -14., 31., -12., -38., 1915  
7 2., -18., 28., 19., -15., 6., -22., 11., 1915  
8 8., 8., -4., -15., -9., 6., 2., -13., 1915  
9 3., 5., -8., 16., 6., -5., 8., -18., 1915  
a 8., 10., -20., 1., 14., -11., 5., 12., 1915  
b -3., 1., -2., -2., 8., 2., 10., 0., 1915  
c -2., -1., 2., -3., -4., 2., 2., 1., 1915  
d -5., 2., -2., 6., 6., -4., 4., 0., 1915  
e 0., -2., 1., 4., 2., 0., 0., -6./ 1915  
data g4/ -31060.,-2317., 5845., -839., 2959.,-1259., 1407., 823., 1920  
1 1111.,-1600., -445., 1205., 103., 839., 293., 889., 1920  
2 695., 220., 616., -134., -424., -153., 199., -57., 1920  
3 -221., 326., -122., 236., 58., -23., -38., -119., 1920  
4 -125., -62., 43., 61., 55., 0., -10., 96., 1920  
5 -233., 11., -46., -22., 44., 18., -101., -57., 1920  
6 73., -54., -49., 2., -14., 29., -13., -37., 1920  
7 4., -16., 28., 19., -16., 6., -22., 11., 1920  
8 7., 8., -3., -15., -9., 6., 2., -14., 1920  
9 4., 5., -7., 17., 6., -5., 8., -19., 1920  
a 8., 10., -20., 1., 14., -11., 5., 12., 1920  
b -3., 1., -2., -2., 9., 2., 10., 0., 1920  
c -2., -1., 2., -3., -4., 2., 2., 1., 1920  
d -5., 2., -2., 6., 6., -4., 4., 0., 1920  
e 0., -2., 1., 4., 3., 0., 0., -6./ 1920  
data g5/ -30926.,-2318., 5817., -893., 2969.,-1334., 1471., 728., 1925  
1 1140.,-1645., -462., 1202., 119., 881., 229., 891., 1925

2 711., 216., 601., -163., -426., -130., 217., -70., 1925  
 3 -230., 326., -96., 226., 58., -28., -44., -125., 1925  
 4 -122., -69., 51., 61., 54., 3., -9., 99., 1925  
 5 -238., 14., -40., -18., 39., 13., -103., -52., 1925  
 6 73., -54., -50., 3., -14., 27., -14., -35., 1925  
 7 5., -14., 29., 19., -17., 6., -21., 11., 1925  
 8 7., 8., -3., -15., -9., 6., 2., -14., 1925  
 9 4., 5., -7., 17., 7., -5., 8., -19., 1925  
 a 8., 10., -20., 1., 14., -11., 5., 12., 1925  
 b -3., 1., -2., -2., 9., 2., 10., 0., 1925  
 c -2., -1., 2., -3., -4., 2., 2., 1., 1925  
 d -5., 2., -2., 6., 6., -4., 4., 0., 1925  
 e 0., -2., 1., 4., 3., 0., 0., -6./ 1925  
 data g6/ -30805., -2316., 5808., -951., 2980., -1424., 1517., 644., 1930  
 1 1172., -1692., -480., 1205., 133., 907., 166., 896., 1930  
 2 727., 205., 584., -195., -422., -109., 234., -90., 1930  
 3 -237., 327., -72., 218., 60., -32., -53., -131., 1930  
 4 -118., -74., 58., 60., 53., 4., -9., 102., 1930  
 5 -242., 19., -32., -16., 32., 8., -104., -46., 1930  
 6 74., -54., -51., 4., -15., 25., -14., -34., 1930  
 7 6., -12., 29., 18., -18., 6., -20., 11., 1930  
 8 7., 8., -3., -15., -9., 5., 2., -14., 1930  
 9 5., 5., -6., 18., 8., -5., 8., -19., 1930  
 a 8., 10., -20., 1., 14., -12., 5., 12., 1930  
 b -3., 1., -2., -2., 9., 3., 10., 0., 1930  
 c -2., -2., 2., -3., -4., 2., 2., 1., 1930  
 d -5., 2., -2., 6., 6., -4., 4., 0., 1930  
 e 0., -2., 1., 4., 3., 0., 0., -6./ 1930  
 data g7/ -30715., -2306., 5812., -1018., 2984., -1520., 1550., 586., 1935  
 1 1206., -1740., -494., 1215., 146., 918., 101., 903., 1935  
 2 744., 188., 565., -226., -415., -90., 249., -114., 1935  
 3 -241., 329., -51., 211., 64., -33., -64., -136., 1935  
 4 -115., -76., 64., 59., 53., 4., -8., 104., 1935  
 5 -246., 25., -25., -15., 25., 4., -106., -40., 1935  
 6 74., -53., -52., 4., -17., 23., -14., -33., 1935  
 7 7., -11., 29., 18., -19., 6., -19., 11., 1935  
 8 7., 8., -3., -15., -9., 5., 1., -15., 1935  
 9 6., 5., -6., 18., 8., -5., 7., -19., 1935  
 a 8., 10., -20., 1., 15., -12., 5., 11., 1935  
 b -3., 1., -3., -2., 9., 3., 11., 0., 1935  
 c -2., -2., 2., -3., -4., 2., 2., 1., 1935  
 d -5., 2., -2., 6., 6., -4., 4., 0., 1935  
 e 0., -1., 2., 4., 3., 0., 0., -6./ 1935  
 data g8/ -30654., -2292., 5821., -1106., 2981., -1614., 1566., 528., 1940  
 1 1240., -1790., -499., 1232., 163., 916., 43., 914., 1940  
 2 762., 169., 550., -252., -405., -72., 265., -141., 1940  
 3 -241., 334., -33., 208., 71., -33., -75., -141., 1940  
 4 -113., -76., 69., 57., 54., 4., -7., 105., 1940

5 -249., 33., -18., -15., 18., 0., -107., -33., 1940  
 6 74., -53., -52., 4., -18., 20., -14., -31., 1940  
 7 7., -9., 29., 17., -20., 5., -19., 11., 1940  
 8 7., 8., -3., -14., -10., 5., 1., -15., 1940  
 9 6., 5., -5., 19., 9., -5., 7., -19., 1940  
 a 8., 10., -21., 1., 15., -12., 5., 11., 1940  
 b -3., 1., -3., -2., 9., 3., 11., 1., 1940  
 c -2., -2., 2., -3., -4., 2., 2., 1., 1940  
 d -5., 2., -2., 6., 6., -4., 4., 0., 1940  
 e 0., -1., 2., 4., 3., 0., 0., -6./ 1940  
 data g9/ -30594., -2285., 5810., -1244., 2990., -1702., 1578., 477., 1945  
 1 1282., -1834., -499., 1255., 186., 913., -11., 944., 1945  
 2 776., 144., 544., -276., -421., -55., 304., -178., 1945  
 3 -253., 346., -12., 194., 95., -20., -67., -142., 1945  
 4 -119., -82., 82., 59., 57., 6., 6., 100., 1945  
 5 -246., 16., -25., -9., 21., -16., -104., -39., 1945  
 6 70., -40., -45., 0., -18., 0., 2., -29., 1945  
 7 6., -10., 28., 15., -17., 29., -22., 13., 1945  
 8 7., 12., -8., -21., -5., -12., 9., -7., 1945  
 9 7., 2., -10., 18., 7., 3., 2., -11., 1945  
 a 5., -21., -27., 1., 17., -11., 29., 3., 1945  
 b -9., 16., 4., -3., 9., -4., 6., -3., 1945  
 c 1., -4., 8., -3., 11., 5., 1., 1., 1945  
 d 2., -20., -5., -1., -1., -6., 8., 6., 1945  
 e -1., -4., -3., -2., 5., 0., -2., -2./ 1945  
 data ga/ -30554., -2250., 5815., -1341., 2998., -1810., 1576., 381., 1950  
 1 1297., -1889., -476., 1274., 206., 896., -46., 954., 1950  
 2 792., 136., 528., -278., -408., -37., 303., -210., 1950  
 3 -240., 349., 3., 211., 103., -20., -87., -147., 1950  
 4 -122., -76., 80., 54., 57., -1., 4., 99., 1950  
 5 -247., 33., -16., -12., 12., -12., -105., -30., 1950  
 6 65., -55., -35., 2., -17., 1., 0., -40., 1950  
 7 10., -7., 36., 5., -18., 19., -16., 22., 1950  
 8 15., 5., -4., -22., -1., 0., 11., -21., 1950  
 9 15., -8., -13., 17., 5., -4., -1., -17., 1950  
 a 3., -7., -24., -1., 19., -25., 12., 10., 1950  
 b 2., 5., 2., -5., 8., -2., 8., 3., 1950  
 c -11., 8., -7., -8., 4., 13., -1., -2., 1950  
 d 13., -10., -4., 2., 4., -3., 12., 6., 1950  
 e 3., -3., 2., 6., 10., 11., 3., 8./ 1950  
 data gb/ -30500., -2215., 5820., -1440., 3003., -1898., 1581., 291., 1955  
 1 1302., -1944., -462., 1288., 216., 882., -83., 958., 1955  
 2 796., 133., 510., -274., -397., -23., 290., -230., 1955  
 3 -229., 360., 15., 230., 110., -23., -98., -152., 1955  
 4 -121., -69., 78., 47., 57., -9., 3., 96., 1955  
 5 -247., 48., -8., -16., 7., -12., -107., -24., 1955  
 6 65., -56., -50., 2., -24., 10., -4., -32., 1955  
 7 8., -11., 28., 9., -20., 18., -18., 11., 1955

8 9., 10., -6., -15., -14., 5., 6., -23., 1955  
 9 10., 3., -7., 23., 6., -4., 9., -13., 1955  
 a 4., 9., -11., -4., 12., -5., 7., 2., 1955  
 b 6., 4., -2., 1., 10., 2., 7., 2., 1955  
 c -6., 5., 5., -3., -5., -4., -1., 0., 1955  
 d 2., -8., -3., -2., 7., -4., 4., 1., 1955  
 e -2., -3., 6., 7., -2., -1., 0., -3./ 1955  
 data gc/ -30421., -2169., 5791., -1555., 3002., -1967., 1590., 206., 1960  
 1 1302., -1992., -414., 1289., 224., 878., -130., 957., 1960  
 2 800., 135., 504., -278., -394., 3., 269., -255., 1960  
 3 -222., 362., 16., 242., 125., -26., -117., -156., 1960  
 4 -114., -63., 81., 46., 58., -10., 1., 99., 1960  
 5 -237., 60., -1., -20., -2., -11., -113., -17., 1960  
 6 67., -56., -55., 5., -28., 15., -6., -32., 1960  
 7 7., -7., 23., 17., -18., 8., -17., 15., 1960  
 8 6., 11., -4., -14., -11., 7., 2., -18., 1960  
 9 10., 4., -5., 23., 10., 1., 8., -20., 1960  
 a 4., 6., -18., 0., 12., -9., 2., 1., 1960  
 b 0., 4., -3., -1., 9., -2., 8., 3., 1960  
 c 0., -1., 5., 1., -3., 4., 4., 1., 1960  
 d 0., 0., -1., 2., 4., -5., 6., 1., 1960  
 e 1., -1., -1., 6., 2., 0., 0., -7./ 1960  
 data gd/ -30334., -2119., 5776., -1662., 2997., -2016., 1594., 114., 1965  
 1 1297., -2038., -404., 1292., 240., 856., -165., 957., 1965  
 2 804., 148., 479., -269., -390., 13., 252., -269., 1965  
 3 -219., 358., 19., 254., 128., -31., -126., -157., 1965  
 4 -97., -62., 81., 45., 61., -11., 8., 100., 1965  
 5 -228., 68., 4., -32., 1., -8., -111., -7., 1965  
 6 75., -57., -61., 4., -27., 13., -2., -26., 1965  
 7 6., -6., 26., 13., -23., 1., -12., 13., 1965  
 8 5., 7., -4., -12., -14., 9., 0., -16., 1965  
 9 8., 4., -1., 24., 11., -3., 4., -17., 1965  
 a 8., 10., -22., 2., 15., -13., 7., 10., 1965  
 b -4., -1., -5., -1., 10., 5., 10., 1., 1965  
 c -4., -2., 1., -2., -3., 2., 2., 1., 1965  
 d -5., 2., -2., 6., 4., -4., 4., 0., 1965  
 e 0., -2., 2., 3., 2., 0., 0., -6./ 1965  
 data ge/ -30220., -2068., 5737., -1781., 3000., -2047., 1611., 25., 1970  
 1 1287., -2091., -366., 1278., 251., 838., -196., 952., 1970  
 2 800., 167., 461., -266., -395., 26., 234., -279., 1970  
 3 -216., 359., 26., 262., 139., -42., -139., -160., 1970  
 4 -91., -56., 83., 43., 64., -12., 15., 100., 1970  
 5 -212., 72., 2., -37., 3., -6., -112., 1., 1970  
 6 72., -57., -70., 1., -27., 14., -4., -22., 1970  
 7 8., -2., 23., 13., -23., -2., -11., 14., 1970  
 8 6., 7., -2., -15., -13., 6., -3., -17., 1970  
 9 5., 6., 0., 21., 11., -6., 3., -16., 1970  
 a 8., 10., -21., 2., 16., -12., 6., 10., 1970

b -4., -1., -5., 0., 10., 3., 11., 1., 1970  
 c -2., -1., 1., -3., -3., 1., 2., 1., 1970  
 d -5., 3., -1., 4., 6., -4., 4., 0., 1970  
 e 1., -1., 0., 3., 3., 1., -1., -4./ 1970  
 data gf/ -30100.,-2013., 5675.,-1902., 3010.,-2067., 1632., -68., 1975  
 1 1276.,-2144., -333., 1260., 262., 830., -223., 946., 1975  
 2 791., 191., 438., -265., -405., 39., 216., -288., 1975  
 3 -218., 356., 31., 264., 148., -59., -152., -159., 1975  
 4 -83., -49., 88., 45., 66., -13., 28., 99., 1975  
 5 -198., 75., 1., -41., 6., -4., -111., 11., 1975  
 6 71., -56., -77., 1., -26., 16., -5., -14., 1975  
 7 10., 0., 22., 12., -23., -5., -12., 14., 1975  
 8 6., 6., -1., -16., -12., 4., -8., -19., 1975  
 9 4., 6., 0., 18., 10., -10., 1., -17., 1975  
 a 7., 10., -21., 2., 16., -12., 7., 10., 1975  
 b -4., -1., -5., -1., 10., 4., 11., 1., 1975  
 c -3., -2., 1., -3., -3., 1., 2., 1., 1975  
 d -5., 3., -2., 4., 5., -4., 4., -1., 1975  
 e 1., -1., 0., 3., 3., 1., -1., -5./ 1975  
 data gg/ -29992.,-1956., 5604.,-1997., 3027.,-2129., 1663., -200., 1980  
 1 1281.,-2180., -336., 1251., 271., 833., -252., 938., 1980  
 2 782., 212., 398., -257., -419., 53., 199., -297., 1980  
 3 -218., 357., 46., 261., 150., -74., -151., -162., 1980  
 4 -78., -48., 92., 48., 66., -15., 42., 93., 1980  
 5 -192., 71., 4., -43., 14., -2., -108., 17., 1980  
 6 72., -59., -82., 2., -27., 21., -5., -12., 1980  
 7 16., 1., 18., 11., -23., -2., -10., 18., 1980  
 8 6., 7., 0., -18., -11., 4., -7., -22., 1980  
 9 4., 9., 3., 16., 6., -13., -1., -15., 1980  
 a 5., 10., -21., 1., 16., -12., 9., 9., 1980  
 b -5., -3., -6., -1., 9., 7., 10., 2., 1980  
 c -6., -5., 2., -4., -4., 1., 2., 0., 1980  
 d -5., 3., -2., 6., 5., -4., 3., 0., 1980  
 e 1., -1., 2., 4., 3., 0., 0., -6./ 1980  
 data gi/ -29873.,-1905., 5500.,-2072., 3044.,-2197., 1687., -306., 1985  
 1 1296.,-2208., -310., 1247., 284., 829., -297., 936., 1985  
 2 780., 232., 361., -249., -424., 69., 170., -297., 1985  
 3 -214., 355., 47., 253., 150., -93., -154., -164., 1985  
 4 -75., -46., 95., 53., 65., -16., 51., 88., 1985  
 5 -185., 69., 4., -48., 16., -1., -102., 21., 1985  
 6 74., -62., -83., 3., -27., 24., -2., -6., 1985  
 7 20., 4., 17., 10., -23., 0., -7., 21., 1985  
 8 6., 8., 0., -19., -11., 5., -9., -23., 1985  
 9 4., 11., 4., 14., 4., -15., -4., -11., 1985  
 a 5., 10., -21., 1., 15., -12., 9., 9., 1985  
 b -6., -3., -6., -1., 9., 7., 9., 1., 1985  
 c -7., -5., 2., -4., -4., 1., 3., 0., 1985  
 d -5., 3., -2., 6., 5., -4., 3., 0., 1985

e 1., -1., 2., 4., 3., 0., 0., -6./ 1985  
data gj/ -29775.,-1848., 5406.,-2131., 3059.,-2279., 1686., -373., 1990  
1 1314.,-2239., -284., 1248., 293., 802., -352., 939., 1990  
2 780., 247., 325., -240., -423., 84., 141., -299., 1990  
3 -214., 353., 46., 245., 154., -109., -153., -165., 1990  
4 -69., -36., 97., 61., 65., -16., 59., 82., 1990  
5 -178., 69., 3., -52., 18., 1., -96., 24., 1990  
6 77., -64., -80., 2., -26., 26., 0., -1., 1990  
7 21., 5., 17., 9., -23., 0., -4., 23., 1990  
8 5., 10., -1., -19., -10., 6., -12., -22., 1990  
9 3., 12., 4., 12., 2., -16., -6., -10., 1990  
a 4., 9., -20., 1., 15., -12., 11., 9., 1990  
b -7., -4., -7., -2., 9., 7., 8., 1., 1990  
c -7., -6., 2., -3., -4., 2., 2., 1., 1990  
d -5., 3., -2., 6., 4., -4., 3., 0., 1990  
e 1., -2., 3., 3., 3., -1., 0., -6./ 1990  
data gk/ -29692.,-1784., 5306.,-2200., 3070.,-2366., 1681., -413., 1995  
1 1335.,-2267., -262., 1249., 302., 759., -427., 940., 1995  
2 780., 262., 290., -236., -418., 97., 122., -306., 1995  
3 -214., 352., 46., 235., 165., -118., -143., -166., 1995  
4 -55., -17., 107., 68., 67., -17., 68., 72., 1995  
5 -170., 67., -1., -58., 19., 1., -93., 36., 1995  
6 77., -72., -69., 1., -25., 28., 4., 5., 1995  
7 24., 4., 17., 8., -24., -2., -6., 25., 1995  
8 6., 11., -6., -21., -9., 8., -14., -23., 1995  
9 9., 15., 6., 11., -5., -16., -7., -4., 1995  
a 4., 9., -20., 3., 15., -10., 12., 8., 1995  
b -6., -8., -8., -1., 8., 10., 5., -2., 1995  
c -8., -8., 3., -3., -6., 1., 2., 0., 1995  
d -4., 4., -1., 5., 4., -5., 2., -1., 1995  
e 2., -2., 5., 1., 1., -2., 0., -7., 1995  
f 75\*0./ 1995  
data gl/ -29619.4,-1728.2, 5186.1,-2267.7, 3068.4,-2481.6, 1670.9, 2000  
1 -458.0, 1339.6,-2288.0, -227.6, 1252.1, 293.4, 714.5, 2000  
2 -491.1, 932.3, 786.8, 272.6, 250.0, -231.9, -403.0, 2000  
3 119.8, 111.3, -303.8, -218.8, 351.4, 43.8, 222.3, 2000  
4 171.9, -130.4, -133.1, -168.6, -39.3, -12.9, 106.3, 2000  
5 72.3, 68.2, -17.4, 74.2, 63.7, -160.9, 65.1, 2000  
6 -5.9, -61.2, 16.9, 0.7, -90.4, 43.8, 79.0, 2000  
7 -74.0, -64.6, 0.0, -24.2, 33.3, 6.2, 9.1, 2000  
8 24.0, 6.9, 14.8, 7.3, -25.4, -1.2, -5.8, 2000  
9 24.4, 6.6, 11.9, -9.2, -21.5, -7.9, 8.5, 2000  
a -16.6, -21.5, 9.1, 15.5, 7.0, 8.9, -7.9, 2000  
b -14.9, -7.0, -2.1, 5.0, 9.4, -19.7, 3.0, 2000  
c 13.4, -8.4, 12.5, 6.3, -6.2, -8.9, -8.4, 2000  
d -1.5, 8.4, 9.3, 3.8, -4.3, -8.2, -8.2, 2000  
e 4.8, -2.6, -6.0, 1.7, 1.7, 0.0, -3.1, 2000  
f 4.0, -0.5, 4.9, 3.7, -5.9, 1.0, -1.2, 2000

g	2.0, -2.9, 4.2, 0.2, 0.3, -2.2, -1.1, 2000
h	-7.4, 2.7, -1.7, 0.1, -1.9, 1.3, 1.5, 2000
i	-0.9, -0.1, -2.6, 0.1, 0.9, -0.7, -0.7, 2000
j	0.7, -2.8, 1.7, -0.9, 0.1, -1.2, 1.2, 2000
k	-1.9, 4.0, -0.9, -2.2, -0.3, -0.4, 0.2, 2000
l	0.3, 0.9, 2.5, -0.2, -2.6, 0.9, 0.7, 2000
m	-0.5, 0.3, 0.3, 0.0, -0.3, 0.0, -0.4, 2000
n	0.3, -0.1, -0.9, -0.2, -0.4, -0.4, 0.8, 2000
o	-0.2, -0.9, -0.9, 0.3, 0.2, 0.1, 1.8, 2000
p	-0.4, -0.4, 1.3, -1.0, -0.4, -0.1, 0.7, 2000
q	0.7, -0.4, 0.3, 0.3, 0.6, -0.1, 0.3, 2000
r	0.4, -0.2, 0.0, -0.5, 0.1, -0.9/ 2000
data gm/-29554.63,-1669.05, 5077.99,-2337.24, 3047.69,-2594.50, 2005	
1	1657.76, -515.43, 1336.30,-2305.83, -198.86, 1246.39, 2005
2	269.72, 672.51, -524.72, 920.55, 797.96, 282.07, 2005
3	210.65, -225.23, -379.86, 145.15, 100.00, -305.36, 2005
4	-227.00, 354.41, 42.72, 208.95, 180.25, -136.54, 2005
5	-123.45, -168.05, -19.57, -13.55, 103.85, 73.60, 2005
6	69.56, -20.33, 76.74, 54.75, -151.34, 63.63, 2005
7	-14.58, -63.53, 14.58, 0.24, -86.36, 50.94, 2005
8	79.88, -74.46, -61.14, -1.65, -22.57, 38.73, 2005
9	6.82, 12.30, 25.35, 9.37, 10.93, 5.42, 2005
a	-26.32, 1.94, -4.64, 24.80, 7.62, 11.20, 2005
b	-11.73, -20.88, -6.88, 9.83, -18.11, -19.71, 2005
c	10.17, 16.22, 9.36, 7.61, -11.25, -12.76, 2005
d	-4.87, -0.06, 5.58, 9.76, -20.11, 3.58, 2005
e	12.69, -6.94, 12.67, 5.01, -6.72, -10.76, 2005
f	-8.16, -1.25, 8.10, 8.76, 2.92, -6.66, 2005
g	-7.73, -9.22, 6.01, -2.17, -6.12, 2.19, 2005
h	1.42, 0.10, -2.35, 4.46, -0.15, 4.76, 2005
i	3.06, -6.58, 0.29, -1.01, 2.06, -3.47, 2005
j	3.77, -0.86, -0.21, -2.31, -2.09, -7.93, 2005
k	2.95, -1.60, 0.26, -1.88, 1.44, 1.44, 2005
l	-0.77, -0.31, -2.27, 0.29, 0.90, -0.79, 2005
m	-0.58, 0.53, -2.69, 1.80, -1.08, 0.16, 2005
n	-1.58, 0.96, -1.90, 3.99, -1.39, -2.15, 2005
o	-0.29, -0.55, 0.21, 0.23, 0.89, 2.38, 2005
p	-0.38, -2.63, 0.96, 0.61, -0.30, 0.40, 2005
q	0.46, 0.01, -0.35, 0.02, -0.36, 0.28, 2005
r	0.08, -0.87, -0.49, -0.34, -0.08, 0.88, 2005
s	-0.16, -0.88, -0.76, 0.30, 0.33, 0.28, 2005
t	1.72, -0.43, -0.54, 1.18, -1.07, -0.37, 2005
u	-0.04, 0.75, 0.63, -0.26, 0.21, 0.35, 2005
v	0.53, -0.05, 0.38, 0.41, -0.22, -0.10, 2005
w	-0.57, -0.18, -0.82/ 2005
data gp/-29496.57,-1586.42, 4944.26,-2396.06, 3026.34,-2708.54, 2010	
1	1668.17, -575.73, 1339.85,-2326.54, -160.40, 1232.10, 2010
2	251.75, 633.73, -537.03, 912.66, 808.97, 286.48, 2010

3	166.58, -211.03, -356.83, 164.46, 89.40, -309.72, 2010
4	-230.87, 357.29, 44.58, 200.26, 189.01, -141.05, 2010
5	-118.06, -163.17, -0.01, -8.03, 101.04, 72.78, 2010
6	68.69, -20.90, 75.92, 44.18, -141.40, 61.54, 2010
7	-22.83, -66.26, 13.10, 3.02, -78.09, 55.40, 2010
8	80.44, -75.00, -57.80, -4.55, -21.20, 45.24, 2010
9	6.54, 14.00, 24.96, 10.46, 7.03, 1.64, 2010
a	-27.61, 4.92, -3.28, 24.41, 8.21, 10.84, 2010
b	-14.50, -20.03, -5.59, 11.83, -19.34, -17.41, 2010
c	11.61, 16.71, 10.85, 6.96, -14.05, -10.74, 2010
d	-3.54, 1.64, 5.50, 9.45, -20.54, 3.45, 2010
e	11.51, -5.27, 12.75, 3.13, -7.14, -12.38, 2010
f	-7.42, -0.76, 7.97, 8.43, 2.14, -8.42, 2010
g	-6.08, -10.08, 7.01, -1.94, -6.24, 2.73, 2010
h	0.89, -0.10, -1.07, 4.71, -0.16, 4.44, 2010
i	2.45, -7.22, -0.33, -0.96, 2.13, -3.95, 2010
j	3.09, -1.99, -1.03, -1.97, -2.80, -8.31, 2010
k	3.05, -1.48, 0.13, -2.03, 1.67, 1.65, 2010
l	-0.66, -0.51, -1.76, 0.54, 0.85, -0.79, 2010
m	-0.39, 0.37, -2.51, 1.79, -1.27, 0.12, 2010
n	-2.11, 0.75, -1.94, 3.75, -1.86, -2.12, 2010
o	-0.21, -0.87, 0.30, 0.27, 1.04, 2.13, 2010
p	-0.63, -2.49, 0.95, 0.49, -0.11, 0.59, 2010
q	0.52, 0.00, -0.39, 0.13, -0.37, 0.27, 2010
r	0.21, -0.86, -0.77, -0.23, 0.04, 0.87, 2010
s	-0.09, -0.89, -0.87, 0.31, 0.30, 0.42, 2010
t	1.66, -0.45, -0.59, 1.08, -1.14, -0.31, 2010
u	-0.07, 0.78, 0.54, -0.18, 0.10, 0.38, 2010
v	0.49, 0.02, 0.44, 0.42, -0.25, -0.26, 2010
w	-0.53, -0.26, -0.79/ 2010
data gq/	-29442.0, -1501.0, 4797.1, -2445.1, 3012.9, -2845.6, 1676.7, 2015
1	-641.9, 1350.7, -2352.3, -115.3, 1225.6, 244.9, 582.0, 2015
2	-538.4, 907.6, 813.7, 283.3, 120.4, -188.7, -334.9, 2015
3	180.9, 70.4, -329.5, -232.6, 360.1, 47.3, 192.4, 2015
4	197.0, -140.9, -119.3, -157.5, 16.0, 4.1, 100.2, 2015
5	70.0, 67.7, -20.8, 72.7, 33.2, -129.9, 58.9, 2015
6	-28.9, -66.7, 13.2, 7.3, -70.9, 62.6, 81.6, 2015
7	-76.1, -54.1, -6.8, -19.5, 51.8, 5.7, 15.0, 2015
8	24.4, 9.4, 3.4, -2.8, -27.4, 6.8, -2.2, 2015
9	24.2, 8.8, 10.1, -16.9, -18.3, -3.2, 13.3, 2015
a	-20.6, -14.6, 13.4, 16.2, 11.7, 5.7, -15.9, 2015
b	-9.1, -2.0, 2.1, 5.4, 8.8, -21.6, 3.1, 2015
c	10.8, -3.3, 11.8, 0.7, -6.8, -13.3, -6.9, 2015
d	-0.1, 7.8, 8.7, 1.0, -9.1, -4.0, -10.5, 2015
e	8.4, -1.9, -6.3, 3.2, 0.1, -0.4, 0.5, 2015
f	4.6, -0.5, 4.4, 1.8, -7.9, -0.7, -0.6, 2015
g	2.1, -4.2, 2.4, -2.8, -1.8, -1.2, -3.6, 2015
h	-8.7, 3.1, -1.5, -0.1, -2.3, 2.0, 2.0, 2015



```

i      -0.7, -0.8, -1.1, 0.6, 0.8, -0.7, -0.2, 2015
j      0.2, -2.2, 1.7, -1.4, -0.2, -2.5, 0.4, 2015
k      -2.0, 3.5, -2.4, -1.9, -0.2, -1.1, 0.4, 2015
l      0.4, 1.2, 1.9, -0.8, -2.2, 0.9, 0.3, 2015
m      0.1, 0.7, 0.5, -0.1, -0.3, 0.3, -0.4, 2015
n      0.2, 0.2, -0.9, -0.9, -0.1, 0.0, 0.7, 2015
o      0.0, -0.9, -0.9, 0.4, 0.4, 0.5, 1.6, 2015
p      -0.5, -0.5, 1.0, -1.2, -0.2, -0.1, 0.8, 2015
q      0.4, -0.1, -0.1, 0.3, 0.4, 0.1, 0.5, 2015
r      0.5, -0.3, -0.4, -0.4, -0.3, -0.8/      2015
data gr/ 10.3, 18.1, -26.6, -8.7, -3.3, -27.4, 2.1, 2017
1      -14.1, 3.4, -5.5, 8.2, -0.7, -0.4, -10.1, 2017
2      1.8, -0.7, 0.2, -1.3, -9.1, 5.3, 4.1, 2017
3      2.9, -4.3, -5.2, -0.2, 0.5, 0.6, -1.3, 2017
4      1.7, -0.1, -1.2, 1.4, 3.4, 3.9, 0.0, 2017
5      -0.3, -0.1, 0.0, -0.7, -2.1, 2.1, -0.7, 2017
6      -1.2, 0.2, 0.3, 0.9, 1.6, 1.0, 0.3, 2017
7      -0.2, 0.8, -0.5, 0.4, 1.3, -0.2, 0.1, 2017
8      -0.3, -0.6, -0.6, -0.8, 0.1, 0.2, -0.2, 2017
9      0.2, 0.0, -0.3, -0.6, 0.3, 0.5, 0.1, 2017
a      -0.2, 0.5, 0.4, -0.2, 0.1, -0.3, -0.4, 2017
b      0.3, 0.3, 0.0, 115*0.0/      2017

```

c

c set initial values

c

x = 0.0

y = 0.0

z = 0.0

if (date.lt.1900.0.or.date.gt.2025.0) go to 11

if (date.gt.2020.0) write (6,960) date

960 format ('/ This version of the IGRF is intended for use up',

1 ' to 2020.0.'/ values for',f9.3,' will be computed',

2 ' but may be of reduced accuracy'/)

if (date.ge.2015.0) go to 1

t = 0.2\*(date - 1900.0)

ll = t

one = ll

t = t - one

c

c SH models before 1995.0 are only to degree 10

c

if (date.lt.1995.0) then

nmx = 10

nc = nmx\*(nmx+2)

ll = nc\*ll

kmx = (nmx+1)\*(nmx+2)/2

else

```

    nmx = 13
    nc = nmx*(nmx+2)
    ll = 0.2*(date - 1995.0)
c
c 19 is the number of SH models that extend to degree 10
c
    ll = 120*19 + nc*ll
    kmx = (nmx+1)*(nmx+2)/2
endif
tc = 1.0 - t
if (isv.eq.1) then
    tc = -0.2
    t = 0.2
end if
go to 2
c
1 t = date - 2015.0
tc = 1.0
if (isv.eq.1) then
    t = 1.0
    tc = 0.0
end if
c
c pointer for last coefficient in pen-ultimate set of MF coefficients...
c
    ll = 3060
    nmx = 13
    nc = nmx*(nmx+2)
    kmx = (nmx+1)*(nmx+2)/2
2 r = alt
one = colat*0.017453292
ct = cos(one)
st = sin(one)
one = elong*0.017453292
cl(1) = cos(one)
sl(1) = sin(one)
cd = 1.0
sd = 0.0
l = 1
m = 1
n = 0
if (itype.eq.2) go to 3
c
c conversion from geodetic to geocentric coordinates
c (using the WGS84 spheroid)
c
    a2 = 40680631.6
    b2 = 40408296.0

```

```

one = a2*st*st
two = b2*ct*ct
three = one + two
rho = sqrt(three)
r = sqrt(alt*(alt + 2.0*rho) + (a2*one + b2*two)/three)
cd = (alt + rho)/r
sd = (a2 - b2)/rho*ct*st/r
one = ct
ct = ct*cd - st*sd
st = st*cd + one*sd
c
3 ratio = 6371.2/r
rr = ratio*ratio
c
c computation of Schmidt quasi-normal coefficients p and x(=q)
c
p(1) = 1.0
p(3) = st
q(1) = 0.0
q(3) = ct
do 10 k=2,kmx
  if (n.ge.m) go to 4
  m = 0
  n = n + 1
  rr = rr*ratio
  fn = n
  gn = n - 1
4 fm = m
  if (m.ne.n) go to 5
  if (k.eq.3) go to 6
  one = sqrt(1.0 - 0.5/fm)
  j = k - n - 1
  p(k) = one*st*p(j)
  q(k) = one*(st*q(j) + ct*p(j))
  cl(m) = cl(m-1)*cl(1) - sl(m-1)*sl(1)
  sl(m) = sl(m-1)*cl(1) + cl(m-1)*sl(1)
  go to 6
5 gmm = m*m
  one = sqrt(fn*fn - gmm)
  two = sqrt(gn*gn - gmm)/one
  three = (fn + gn)/one
  i = k - n
  j = i - n + 1
  p(k) = three*ct*p(i) - two*p(j)
  q(k) = three*(ct*q(i) - st*p(i)) - two*q(j)
c
c synthesis of x, y and z in geocentric coordinates
c

```

```

6 lm = ll + l
  one = (tc*gh(lm) + t*gh(lm+nc))*rr
  if (m.eq.0) go to 9
  two = (tc*gh(lm+1) + t*gh(lm+nc+1))*rr
  three = one*cl(m) + two*sl(m)
  x = x + three*q(k)
  z = z - (fn + 1.0)*three*p(k)
  if (st.eq.0.0) go to 7
  y = y + (one*sl(m) - two*cl(m))*fm*p(k)/st
  go to 8
7 y = y + (one*sl(m) - two*cl(m))*q(k)*ct
8 l = l + 2
  go to 10
9 x = x + one*q(k)
  z = z - (fn + 1.0)*one*p(k)
  l = l + 1
10 m = m + 1
c
c conversion to coordinate system specified by itype
c
  one = x
  x = x*cd + z*sd
  z = z*cd - one*sd
  f = sqrt(x*x + y*y + z*z)
c
  return
c
c error return if date out of bounds
c
11 f = 1.0d8
  write (6,961) date
961 format (' This subroutine will not work with a date of',
1 f9.3, '. Date must be in the range 1900.0.ge.date',
2 '.le.2025.0. On return f = 1.0d8., x = y = z = 0.')
  return
end

```

## ANEXO II. RUTINA DESARROLLADA PARA AJUSTAR CUALQUIER SUPERFICIE A UN PLANO LINEAL

```
function [dat_adj]=rpol(dat)

% Funcion que ajusta un plano lineal a partir de un archivo de tres columnas
% longitud, latitud, z

dat_adj=zeros(size(dat));
x1=dat(:,1);
x2=dat(:,2);
y=dat(:,3);
n=length(x1);
s=[n sum(x1) sum(x2) sum(y);
   sum(x1) sum(x1.^2) sum(x1.*x2) sum(x1.*y);
   sum(x2) sum(x1.*x2) sum(x2.^2) sum(x2.*y)];
a=rref(s);
p1=a(1,4);
p2=a(2,4);
p3=a(3,4);
ya=p1 + p2.*x1 + p3.*x2;
dat_adj(:,3)=y-ya;
dat_adj(:,1:2)=dat(:,1:2);

end
```

## ANEXO III. RUTINA EMPLEADA PARA CALCULAR LA ANOMALÍA MAGNÉTICA DE UN POLÍGONO

### DE N-LADOS, MODIFICADA DE WON & BEVIS (1987)

```
function tmf=m_poly(xs,zs,xv,zv,k,l,B,He)
% *****
% Funcion que calcula el campo magnético total (anom_t) para n estaciones (xs) producida por un
polígono de n vértices
% l = inclination in degrees; B = strike in degrees; k = susceptibility
% *****

dtr = pi/180;
c1 = sin(l*dtr);
c2 = sin(B*dtr)*cos(l*dtr);
c3 = 2*k*He;
nstdn = length(xs);
nvert = length(xv(:,1));
nbody = length(xv(1,:));
tmf = zeros(nstdn,1);
%200
for ib=1:nbody

    %100
    for is=1:nstdn
        xstdn = xs(is);
        zstdn = zs(is);
        hx = 0;
        hz = 0;
        %50
        for ic=1:nvert
            x1 = xv(ic,ib)-xstdn;
            z1 = zv(ic,ib)-zstdn;
            if ic==nvert
                x2 = xv(1,ib)-xstdn;
                z2 = zv(1,ib)-zstdn;
            else
                x2 = xv(ic+1,ib)-xstdn;
                z2 = zv(ic+1,ib)-zstdn;
            end

            if x1==0 && z1==0
                gz = 0;
            else
                th1 = atan2(z1,x1);
            end
        end
    end
end
```

```

if x2==0 && z2==0
    gz = 0;
else
    th2 = atan2(z2,x2);
end

if sign(z1)~=sign(z2)
    test = x1*z2 - x2*z1;
    if test > 0
        if z1 >= 0
            th2 = th2 + 2*pi;
        end
    elseif test < 0
        if z2 > 0
            th1 = th1 + 2*pi;
        else
            gz = 0;
        end
    end
end
end

t12 = th1 - th2;
z21 = z2 - z1;
x21 = x2 - x1;
x21s = x21^2;
z21s = z21^2;
xz12 = x1*z2 - x2*z1;
r1s = x1^2 + z1^2;
r2s = x2^2 + z2^2;
r21s = x21^2 + z21^2;
rln = 0.5 * log(r2s/r1s);
p = (xz12/r21s) * ((x1*x21-z1*z21)/r1s - (x2*x21-z2*z21)/r2s);
q = (xz12/r21s) * ((x1*z21+z1*x21)/r1s - (x2*z21+z2*x21)/r2s);

if x21==0
    dzz = -p;
    dzx = q - z21s*rln/r21s;
    dxz = q;
    dxx = p + z21s*t12/r21s;
else
    z21dx21 = z21/x21;
    x21z21 = x21*z21;
    fz = (t12+z21dx21*rln)/r21s;
    fx = (t12*z21dx21-rln)/r21s;
    dzz = -p + x21s*fz;
    dzx = q - x21z21*fz;
    dxz = q - x21s*fx;
    dxx = p + x21z21*fx;
end

```

```

end

hz = c3*(c1*dzz + c2*dzx) + hz;
hx = c3*(c1*dxz + c2*dxx) + hx;
%50
end
anom_z(is) = hz;
anom_x(is) = hx;
anom_t(is,ib) = c1*hz+c2*hx;

%100
end

tmf=tmf+anom_t(:,ib);
%200
end

```



ANEXO IV. RUTINA EMPLEADA PARA CALCULAR LA ANOMALÍA GRAVITATORIA PRODUCIDA  
POR UN POLÍGONO IRREGULAR DE N-LADOS, MODIFICADA DE BLAKELY (1996).

```
function [g] = g_poly(x0,z0,xcorn,zcorn)
% *****
% [g] = g_poly(x0,z0,xcorn,zcorn,ncorn,rho)
% *****
ncorn = length(xcorn(:,1));
SUM = 0;
for n = 1:ncorn
    if n==ncorn
        n2 = 1;
    else
        n2 = n+1;
    end
    x1 = xcorn(n)-x0;
    z1 = zcorn(n)-z0;
    x2 = xcorn(n2)-x0;
    z2 = zcorn(n2)-z0;
    r1sq = x1^2+z1^2;
    r2sq = x2^2+z2^2;
    denom = z2-z1;
    if denom == 0
        denom = 1e-6;
    end
    ALPHA = (x2-x1)/denom;
    BETA = (x1*z2-x2*z1)/denom;
    FACTOR = BETA/(1+ALPHA^2);
    term1 = 0.5*(log(r2sq)-log(r1sq));
    term2 = atan2(z2,x2)-atan2(z1,x1);
    SUM = SUM + FACTOR*(term1-ALPHA*term2);
end
g = 2*350*6.67e-11*SUM*1e5*1e3;
end
```